

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ РЕСПУБЛИКИ БЕЛАРУСЬ  
Белорусский национальный технический университет

---

Кафедра «Детали машин и подъемно-транспортные машины  
и механизмы»

В. Л. Николаенко  
Т. Н. Микулик

РАСЧЕТ ДВУХЦЕПНОЙ ПРОМЕЖУТОЧНОЙ ОПОРЫ  
БАШЕННОГО ТИПА

Учебно-методическое пособие  
для студентов специальности 1-43 01 02  
«Электроэнергетические системы и сети»

*Рекомендовано учебно-методическим объединением по образованию  
в области энергетики и энергетического оборудования*

Минск  
БНТУ  
2016

УДК 621.81(075.8)  
ББК 31.279я7  
Н64

Рецензенты:

кафедра «Теоретическая механика и теория механизмов и машин»  
БГАТУ (зав. кафедрой д-р техн. наук, профессор *А. Н. Орда*);  
профессор кафедры «Инженерная графика» БГУИР *В. М. Сурин*

**Николаенко, В. Л.**

Н64 Расчет двухцепной промежуточной опоры башенного типа : учебно-методическое пособие для студентов специальности 1-43 01 02 «Электроэнергетические системы и сети» / В. Л. Николаенко, Т. Н. Микулик. – Минск : БНТУ, 2016. – 66 с.  
ISBN 978-985-550-869-5.

Учебно-методическое пособие к курсовому проектированию по дисциплине «Механика» предназначено для студентов энергетических специальностей дневной и заочной форм обучения.

Приведен ряд методических указаний, необходимых при выполнении курсового проекта.

УДК 621.81(075.8)  
ББК 31.279я7

ISBN 978-985-550-869-5

© Николаенко В. Л., Микулик Т. Н., 2016  
© Белорусский национальный  
технический университет, 2016

## Предисловие

В курсовом проектировании по дисциплине «Прикладная механика» для студентов специальности «Электроэнергетические системы и сети» проводится расчет промежуточных опор башенного типа.

Расчет опор башенного типа имеет свои особенности. Все башенные свободностоящие опоры являются консолями, жестко или упруго заземленными нижним концом. Под действием системы горизонтальных и вертикальных нагрузок опора деформируется. Как показывают расчеты, башенные опоры имеют прогиб не более  $1/50$  высоты, при этом функция влияния вертикальных сил на увеличение прогиба опоры практически равна нулю, поэтому такие опоры рассчитываются на поперечный изгиб и сжатие от собственного веса и веса проводов и тросов.

В сжатых элементах опор могут возникать изгибающие моменты, например, от ветровой нагрузки на стойки или от тяжения провода при одностороннем обрыве, но в правильно сконструированной опоре изгибающие моменты сравнительно невелики и не являются решающими для расчета конструкции опор.

Расчет промежуточных прямых опор ведется при следующих условиях:

1. Провода и тросы не оборваны и свободны от гололеда. Ветер максимальной скорости направлен перпендикулярно линии. Следует также рассматривать направление ветра под углом  $45^\circ$  к оси линии, если при этом направлении получаются большие усилия в отдельных элементах опоры.

2. Провода и тросы не оборваны и покрыты гололедом. Скорость ветра равна 50 % максимальной (скоростной напор – 0,25 максимального). В III, IV и в особо гололедных районах скорость ветра – не менее 15 м/с, скоростной напор – не менее 14 даН/м.

3. Аварийный режим для промежуточных опор с подвесными изоляторами: оборван провод одной фазы – гололеда и ветра нет. Тросы не оборваны. В расчете следует считать оборванным тот провод, обрыв которого вызывает наибольшие усилия в рассматриваемом элементе.

4. Оборван трос при тяжении, равном половине максимального. Гололеда и ветра нет. Провода не оборваны.

За исходные данные в расчете промежуточных опор башенного типа принимаются номинальное напряжение линии и климатические условия, т. е. ветровой район, район по гололедности, повторяемость скоростного напора и гололедности.

Расчет начинается с выбора марки проводов, тросов, шифра опоры и типа изоляторов, удовлетворяющих исходным данным. На основании марки проводов по справочнику выбираются габаритный и весовой пролеты, необходимые для расчета стрелы провеса провода и троса:

$$f = \frac{l^2 \gamma}{8\sigma}, \text{ м,}$$

где  $l$  – габаритный пролет, м;

$\gamma$  – удельная нагрузка в рассматриваемом режиме, даН/(м·мм<sup>2</sup>);

$\sigma$  – допускаемое напряжение при наибольшей нагрузке и низкой температуре, даН/мм<sup>2</sup>.

Важным этапом в расчете опоры является определение расчетных нагрузок от проводов и тросов. Эти расчеты включают в себя определение:

а) нагрузок от собственного веса провода или троса

$$P_1^H = m \cdot 10^{-3}, \text{ даН/м;}$$

$$G_1^H = P_1^H l, \text{ даН,}$$

где  $m$  – масса провода или троса на километр;

б) нормативной нагрузки от веса гололеда на проводах и тросах

$$P_2^H = \pi \gamma c (d + c) \cdot 10^{-3}, \text{ даН/м,}$$

где  $\gamma$  – удельный вес льда, даН/мм<sup>2</sup>;

$c$  – толщина гололедных отложений, мм;

$d$  – диаметр провода или троса, мм.

$$C_2^H = P_2^H l, \text{ даН;}$$

в) нормативной горизонтальной нагрузки от давления ветра на провода и тросы

$$P_3 = \alpha k_L C_x q d \sin \varphi \cdot 10^{-3}, \text{ даН/м},$$

где  $\alpha$  – коэффициент неравномерности распределения ветра по длине пролета;

$k_L$  – коэффициент, учитывающий влияние длины пролета на ветровую нагрузку;

$C_x$  – коэффициент лобового сопротивления;

$Q$  – скоростной напор, определяемый по исходным данным на заданной высоте с помощью справочника, даН/м<sup>2</sup>;

$\varphi$  – угол между направлением ветра и проводами ВЛ.

Расчеты ведутся при углах 45 и 90°.

Полученные расчетные нагрузки на опору от проводов и тросов для удобства дальнейших расчетов сводятся в таблицу с учетом коэффициентов сочетания и перегрузки.

Следующим этапом является расчет ветровой нагрузки на конструкцию опоры в соответствии с указаниями СНиП.

Расчетная ветровая нагрузка находится с учетом коэффициента динамичности  $\beta$ , учитывающего порывы ветра, и коэффициента перегрузки  $n$  и рассчитывается в двух режимах: при ветре, направленном перпендикулярно оси линии и под углом 45° к ней.

Особенностью этого этапа является то, что нагрузки высчитываются на отдельные части опоры: траверсы, тросостойку, стойку. Стойка для удобства расчета разбивается на верхнюю, среднюю и нижнюю секции.

Нагрузка определяется по формуле

$$W^P = C_t F \beta n q, \text{ даН},$$

где  $C_t$  – аэродинамический коэффициент:

$$C_t = C_x (1 + \eta);$$

$$\eta \approx 1,$$

где  $C_x = 1,4\phi$  – аэродинамический коэффициент плоской фермы;

$\phi$  – коэффициент заполнения;

$F$  – площадь по контуру,  $\text{м}^2$ ;

$q$  – скоростной напор на заданной высоте,  $\text{даН/м}^2$ .

Полученные расчетные ветровые нагрузки на конструкцию опоры сводятся в таблицу с учетом коэффициентов сочетания и перегрузки.

Следующим этапом является расчет ствола опоры. Сначала определяются усилия в поясах ствола опоры. Так как по своей длине каждая секция имеет пояса одного и того же профиля, то для определения размера профиля достаточно найти усилия в нижней секции панели. Для этого определяются поперечная нагрузка и величина изгибающего момента. Расчет ведется на основе ранее рассчитанных нагрузок и выбранных геометрических размеров.

Далее рассчитываются усилия в раскосах ствола опоры. Как в большинстве случаев расчета промежуточных опор, расчетным режимом является аварийный – обрыв троса или провода. Кроме того, необходимо учитывать схему решетки ствола (треугольная, перекрестная и раскосная). Каждая схема рассчитывается по своей формуле.

Точно таким же образом рассчитываются усилия в поясах и раскосах траверс опоры.

Критическая сила ствола определяется из выражения

$$N_{\text{кр}} = 4F\delta_l\phi, \text{ даН},$$

где  $F$  – площадь сечения пояса ствола,  $\text{см}^2$ ;

$\phi$  – коэффициент продольного изгиба, соответствующий приведенной гибкости ствола.

Также ствол проверяется на сжатие с прогибом в предельном состоянии и проверяется на действие:

а) реальной поперечной силы;

б) условной поперечной силы.

Траверса опоры является объемной деталью, но для удобства расчет проводится для плоской фермы, к которой сводится объемная.

Расчет фермы следует начать с определения значений опорных реакций, для чего будет использоваться условие равновесия сил, приложенных к ферме. Нужно заметить, что все нагрузки, действующие на траверсу, действуют в узлах решетки.

На основании проделанного расчета производят подбор стержней. Подобранные стержни траверсы проверяют на прочность. Если условие

$$\delta_{\text{расч}} \leq [\delta]$$

выполняется, то уголки подобраны правильно.

Важной частью расчета опор является расчет соединений на прочность. Раскосы решеток прикрепляются к поясам внахлестку, в основном фланговыми швами, поперечные лобовые швы добавляются лишь в исключительных случаях, когда прочность фланговых швов недостаточна.

Расчет сварного соединения для стержня производится по формуле

$$\sigma = \frac{N^P}{\delta_{\text{ш}} l_{\text{ш}}} \leq R_y^{\text{св}},$$

где  $R_y^{\text{св}}$  – расчетное сопротивление сварного шва на растяжение или сжатие;

$\delta_{\text{ш}}$  – расчетная толщина шва, равная меньшей из толщин свариваемых элементов:

$$\delta_{\text{ш}} = \beta h_w,$$

где  $\beta$  – коэффициент, при ручной сварке равный 0,7;

$\delta$  – ширина элемента;

$l_{\text{ш}}$  – длина сварного шва, равная ширине элемента минус 1 см (на непровар):

$$l_{\text{ш}} = \delta - 1, \text{ см.}$$

Болтовое соединение проверяется на срез и смятие. Условие прочности при срезе

$$N^P \leq \frac{\pi d^2}{4} n m_c R_{\text{ср}},$$

где  $d$  – диаметр болта;

$n$  – количество болтов в соединении;

$m_c$  – количество срезов;

$R_{cp}$  – расчетное сопротивление среза.

Условие прочности на смятие

$$N^P \leq d\delta_{\Sigma}nR_{cm},$$

где  $\delta_{\Sigma}$  – минимальная суммарная толщина листов соединения, сминаемых болтом в одном направлении;

$R_{cm}$  – расчетное сопротивление смятию.

Анкерные болты проверяются на растяжение с помощью условия прочности

$$\frac{U}{nF_{пт}} \leq R_p^{\delta},$$

где  $U$  – расчетная продольная сила, действующая на болтовое соединение;

$n$  – число болтов;

$F_{пт}$  – площадь сечения болта, определяемая по формуле

$$F_{пт} = \frac{\pi}{16}(d_2 - d_3)^2,$$

где  $d_2$  – номинальный средний диаметр резьбы;

$$d_3 = d_1 - \frac{H}{6d},$$

где  $d_1$  – номинальный внешний диаметр резьбы;

$H$  – высота болта;

$R_p^{\delta}$  – расчетное сопротивление растяжению болта.

Таким образом, приведенные особенности расчета позволяют рассчитывать на прочность и сконструировать промежуточные опоры башенного типа.

## 1. КЛАССИФИКАЦИЯ ПРОМЕЖУТОЧНЫХ ОПОР

Воздушные линии электропередачи служат для передачи и распределения электроэнергии по проводам, расположенным на открытом воздухе и закрепляемым при помощи изоляторов и линейной арматуры на опорах, а в отдельных случаях – на кронштейнах или стойках инженерных сооружений.

Для проектирования и сооружения линий электропередачи разработаны специальные правила и стандарты.

Расстояния между проводами, между проводами и заземленными частями опор, а также от проводов до поверхности земли следует принимать такими, чтобы при рабочем напряжении линии была исключена возможность электрических разрядов между проводами, с проводов на опору и на наземные сооружения и предметы.

Основными климатическими факторами, определяющими нагрузки, являются ветер и гололед. Длительные наблюдения позволили установить границы ветровых и гололедных районов, различающихся скоростью ветра и интенсивностью гололедных образований.

По числу цепей линии электропередачи делятся на одно-, двух- и многоцепные.

В зависимости от способа подвески проводов опоры делятся на две основные группы:

а) опоры промежуточные, на которых провода закрепляются в поддерживающих зажимах;

б) опоры анкерного типа, служащие для натяжения проводов; на этих опорах провода закрепляются в натяжных зажимах.

Стальные опоры, установленные на линиях электропередачи, имеют самые разнообразные решения схем и конструкций.

Стальные опоры, применяемые на линиях электропередачи напряжением 35 кВ и выше, по конструктивному решению ствола могут быть отнесены к двум основным схемам: башенным или одностоечным (рис. 1.1) и порталным (рис. 1.2), а по способу закрепления на фундаментах – к свободностоящим опорам и опорам на оттяжках.

Опоры изготавливаются из стального уголкового проката, причем в подавляющем большинстве случаев применяется равнобокий уголок; высокие переходные опоры могут быть изготовлены из стальных труб. В узлах соединения элементов применяется стальной лист различной толщины. Это основной сортмент проката, приме-

няемый в опорах; в отдельных случаях могут быть использованы и другие виды проката.

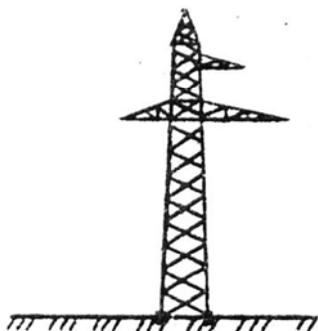


Рис. 1.1. Башенная опора

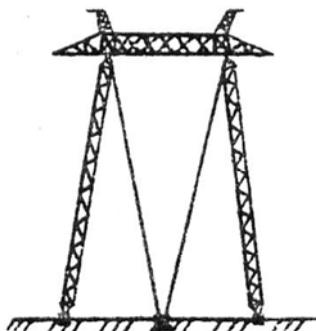


Рис. 1.2. Портальная опора

По способу соединения элементов стальные опоры разделяются на сварные и болтовые. В первом случае все соединения стержней пространственной конструкции опоры выполняются сваркой, а во втором – крепятся болтами. Практически чисто сварных или чисто болтовых соединений не бывает.

Сварные опоры изготавливаются на заводе в виде нескольких пространственных сварных секций, которые соединяются на месте установки при помощи болтов. Болтовые опоры обычно имеют отдельные элементы со сварными соединениями.

## **2. РАСЧЕТ СТАЛЬНОЙ СВОБОДНОСТОЯЩЕЙ ПРОМЕЖУТОЧНОЙ ОПОРЫ БАШЕННОГО ТИПА**

### **2.1. Расчет нагрузок на опору от проводов и тросов**

Расположение проводов на опоре – по вершинам шестиугольника (тип «бочка»), решетка граней перекрестная, не совмещенная в узлах смежных граней (рис. 2.1). Высота крепления гирлянд нижних проводов равна 22,5 м, что на основании расчета провода марки АС-300/39 при заданных климатических условиях соответствует габаритному пролету 440 м.



Тип опоры выбирается из табл. 2.1 или [4, п. 8.20–8.24].

Таблица 2.1

Основные характеристики унифицированных и типовых опор

| Номинальное напряжение, кВ | Шифр опоры | Марка провода   | Толщина стенки гололеда | Длины пролетов, м |          |                    | Вес опоры, кг |
|----------------------------|------------|-----------------|-------------------------|-------------------|----------|--------------------|---------------|
|                            |            |                 |                         | габаритного       | весового | ветрового          |               |
| 35                         | ПЗ5-1      | АС70/11-150/24  | 5–20                    | 160–240           | 200–300  | 225–335            | 1558          |
|                            | ПЗ5-2      | АС70/11-150/24  | 15–20                   | 235–330           | 235–420  | 295–335            | 1934          |
| 110                        | П110-3     | АС120/19-240/32 | 5–10                    | 365–440           | 455–555  | 435–445            | 2558          |
|                            | П110-7     | АС120/19-240/32 | 5–10                    | 410–505           | 515–630  | 460–505            | 2820          |
|                            | П110-4     | АС120/19-240/32 | 5–10                    | 365–445           | 455–555  | 435–445            | 3336          |
|                            | П110-6     | АС70/11-240/32  | 15–20                   | 200–330           | 250–415  | 240–330            | 3942          |
| 220                        | П220-3     | АС300/39-400/51 | 5–20                    | 380–520           | 475–650  | 520 520<br>465–470 | 4881          |
|                            | П220-1     |                 |                         | 380–520           | 475–650  |                    | 3812          |
|                            | П220-2     |                 |                         | 395–470           | 430–550  |                    | 6450          |
| 330                        | ПЗ30-3     | АС300/39-400/51 | 5–10                    | 365–495           | 565–620  | 495                | 6392          |
|                            | ПЗ30-2     | АС300/39-400/51 | 5–20                    | 325–445           | 405–555  | 425–445            | 10475         |

Из тех же источников выбираются марка провода, габаритный и ветровой пролеты.

Весовой пролет

$$l_{\text{вес}} = 1,25l_{\text{габ}} = 1,25 \cdot 440 = 550 \text{ м.}$$

Ветровой пролет  $l_{\text{ветр}} = 470 \text{ м.}$

Стрела провеса провода

$$f = \frac{l_{\text{габ}}^2 \gamma}{8\sigma},$$

где  $l_{\text{габ}}$  – габаритный пролет принимаем 440;

$\gamma = 33,4 \cdot 10^{-3} \text{ Н/(м мм}^2\text{)}$  – удельная нагрузка в рассматриваемом режиме (табл. 2.2);

$\sigma = 81 \text{ Н/мм}^2$  – напряжение в рассматриваемом режиме (табл. 2.2).

Тогда

$$f = \frac{440^2 \cdot 33,4 \cdot 10^{-3}}{(8 \cdot 81)} = 9,98 \text{ м.}$$

Таблица 2.2

Механические характеристики проводов и тросов

| Марки и сечения, мм <sup>2</sup>                               | Удельная нагрузка от собственного веса $\gamma$ , $10^{-2}$ даН/(м·мм <sup>2</sup> ) | Нормативные допускаемые напряжения  |   |
|--|--|---|---|
|  |  | при наибольшей нагрузке и низшей температуре $\sigma_s$ , даН/мм <sup>2</sup> | при средне-годовой температуре $\sigma_s$ , даН/мм <sup>2</sup> |
| АС с сечениями:  |  |   |   |
| 120/19, 150/24, 185/29, 240/39, 300/48, 400/64                 | 3,46   | 13  | 8,7   |
| 150/19, 185/24, 240/32, 300/39, 330/43, 400/51, 450/56, 500/64 | 3,34   | 12,2  | 8,1   |
| 120/27, 150/34, 185/43, 240/56, 300/66, 400/93                 | 3,71   | 14,9  | 9,9   |
| 240/56, 300/66, 400/93, 185/128, 300/204, 500/336              | 4,84   | 25  | 16,5  |
| Стальные канаты всех сечений                                   | 8  | 62  | 42  |

Высота центра тяжести проводов

$$h_c = h_{cp} - \frac{2}{3} f,$$

где  $h_{cp}$  – средняя высота точки подвеса провода или троса к изоляторам;

$f$  – наибольшая стрела провеса провода или троса.

Возьмем изоляторы ПС70-5, длина 2,3 м, масса изолятора 67,0 кг (табл. 2.3).

Таблица 2.3

Основные характеристики изоляции  
на промежуточных опорах воздушных линий

| Номинальное напряжение, кВ | Тип изолятора | Количество изоляторов | Высота изолятора или длина гирлянды с арматурой S, м | Масса изолятора с арматурой, кг |
|----------------------------|---------------|-----------------------|--|---------------------------------|
| 330                        | ПФ-70-В       | 19                    | 3  | 118                             |
|                            | ПС-70-Б       | 21                    | 3,2  | 111                             |
|                            | ПС 120-А      | 17                    | 3,1  | 130                             |
| 35                         | ПФ-70-В       | 3                     | 0,69   | 19                              |
|                            | ПС-70-Б       | 3                     | 0,68   | 16                              |
| 110                        | ПФ-70-В       | 7                     | 1,25   | 38                              |
|                            | ПС-70-Б       | 8                     | 1,35   | 36                              |
| 220                        | ПФ-70-В       | 13                    | 2,2  | 72                              |
|                            | ПС-70-Б       | 14                    | 2,3  | 67                              |

Высота центра тяжести проводов гирлянды (см. рис. 2.1):

$$h_{c3} = (22,5 - 2,3) - (2/3) \cdot 9,98 = 13,55 \text{ м};$$

$$h_{c2} = (29 - 2,3) - (2/3) \cdot 9,98 = 20,05 \text{ м};$$

$$h_{c1} = (35,5 - 2,3) - (2/3) \cdot 9,98 = 26,55 \text{ м}.$$

Грозозащитный трос имеет меньшую стрелу провеса. Рассчитаем ее при  $\gamma = 80 \cdot 10^{-3} \text{ Н/(м} \cdot \text{мм}^2)$ ,  $\sigma = 420 \text{ Н/мм}^2$ .

$$f_T = \frac{440^2 \cdot 80 \cdot 10^{-3}}{(420 \cdot 8)} = 4,61 \text{ м}.$$

Высота центра тяжести троса

$$h_{\text{ст}} = 41 - (2/3) \cdot 4,61 = 37,93 \text{ м.}$$

Находим расчетные нагрузки на опору от проводов и тросов.

1. Расчетная вертикальная нагрузка от собственного веса проводов определяется по формуле

$$G_1^p = Pl_{\text{вес}},$$

где  $P$  – нормативная нагрузка от веса на 1 м провода или троса;

$l_{\text{вес}}$  – весовой пролет.

Нагрузка от веса провода  $P = 1,132$  кг/м.

$$G_1^p = 1,132 \cdot 550 = 622,6 \text{ даН.}$$

С учетом коэффициента перегрузки  $n = 1,1$

$$G^p = nG_1^p = 1,1 \cdot 622,6 = 684,86 \text{ даН.}$$

2. Расчетная нагрузка от веса гололедных отложений на проводах

$$G_2^p = P_{\Gamma} l_{\text{вес}},$$

где  $P_{\Gamma}$  – нормативная нагрузка от веса гололедных отложений на 1 м провода, определяемая в предположении цилиндрической формы гололедных образований с удельным весом льда  $\gamma = 0,9$  гс/см<sup>3</sup> и толщиной стенки гололеда  $c$ :

$$P_{\Gamma} = \pi c \gamma (d + c) \cdot 10^{-3},$$

где  $d$  – диаметр провода (табл. 2.4).

Сталеалюминевые провода марок АС

| Номинальное сечение, мм <sup>2</sup> , алюминий/сталь (по марке провода) | Число и диаметр проволок, мм |          | Сечение, мм <sup>2</sup> |       |       | Диаметр провода $d$ , мм | Электрическое сопротивление постоянному току при 20 °С, Ом/км, не более | Ток, А | Разрывное усилие, кгс, не менее, для проводов из алюминиевой проволоки |      | Масса провода $M_{пр}$ , кг/км | Строительная длина, м |
|--|------------------------------|----------|--------------------------|-------|-------|--------------------------|---|--------|--|------|--------------------------------|-----------------------|
|  | алюминевых                   | стальных | алюминия                 | стали | всего |                          |   |        | АТ   | АТп  |                                |                       |
| 1  | 2                            | 3        | 4                        | 5     | 6     | 7                        | 8   | 9      | 10   | 11   | 12                             | 13                    |
| С отношением А : С = 6   |                              |          |                          |       |       |                          |   |        |  |      |                                |                       |
| 10/1,8   | 6×1,5                        | 1×1,50   | 10,6                     | 1,77  | 12,37 | 4,5                      | 2,695   | 80     | 371  | 396  | 42,7                           | 3000                  |
| 16/2,7   | 6×1,85                       | 1×1,85   | 16,1                     | 2,69  | 18,79 | 5,6                      | 1,772   | 105    | 572  | 602  | 65                             | 3000                  |
| 25/4,2   | 6×2,30                       | 1×2,30   | 24,9                     | 4,15  | 29,05 | 6,9                      | 1,146   | 130    | 871  | 894  | 100                            | 3000                  |
| 35/6,2   | 6×2,80                       | 1×2,80   | 36,9                     | 6,15  | 43,05 | 8,4                      | 0,773   | 175    | 1274   | 1323 | 148                            | 3000                  |
| 50/8   | 6×3,20                       | 1×3,20   | 48,2                     | 8,04  | 56,24 | 9,6                      | 0,592   | 210    | 1632   | 1675 | 194                            | 3000                  |
| 70/11  | 6×3,80                       | 1×3,80   | 68                       | 11,3  | 79,3  | 11,4                     | 0,42  | 265    | 2298   | 2329 | 274                            | 3000                  |
| 95/16  | 6×4,50                       | 1×4,50   | 95,4                     | 15,9  | 111,3 | 13,6                     | 0,299   | 330    | 3185   | 3270 | 384                            | 1500                  |
| С отношением А : С = 6,11–6,25   |                              |          |                          |       |       |                          |   |        |  |      |                                |                       |
| 95/15  | 26×2,12                      | 7×1,65   | 91,7                     | 15    | 106,7 | 13,5                     | 0,314   | 330    | 3202   | 3385 | 370                            | 1500                  |
| 120/19   | 26×2,40                      | 7×1,85   | 118                      | 18,8  | 136,8 | 15,2                     | 0,245   | 380    | 4064   | 4182 | 471                            | 1500                  |
| 150/24   | 26×2,70                      | 7×2,10   | 149                      | 24,2  | 173,2 | 17,1                     | 0,194   | 445    | 5108   | 5331 | 600                            | 2000                  |
| 185/29   | 26×2,98                      | 7×2,30   | 181                      | 29    | 210,0 | 18,3                     | 0,159   | 510    | 6081   | 6353 | 728                            | 2000                  |
| 240/39   | 26×3,40                      | 7×2,65   | 236                      | 38,6  | 274,6 | 21,6                     | 0,122   | 610    | 8013   | 8249 | 952                            | 2000                  |

Продолжение табл. 2.4

| 1                              | 2       | 3       | 4   | 5    | 6     | 7    | 8     | 9    | 10    | 11    | 12   | 13   |
|--------------------------------|---------|---------|-----|------|-------|------|-------|------|-------|-------|------|------|
| 300/48                         | 26×3,80 | 7×2,95  | 295 | 47,8 | 342,8 | 24,1 | 0,098 | 690  | 9969  | 10116 | 1186 | 2000 |
| 400/64                         | 26×4,37 | 7×3,40  | 390 | 63,5 | 453,5 | 27,7 | 0,074 | 835  | 12783 | 13173 | 1572 | 1500 |
| С отношением А : С = 7,71–8,04 |         |         |     |      |       |      |       |      |       |       |      |      |
| 150/19                         | 24×2,8  | 7×1,85  | 148 | 18,8 | 166,8 | 16,8 | 0,195 | 450  | 4500  | 4722  | 554  | 2000 |
| 185/24                         | 24×3,15 | 7×2,10  | 187 | 24,2 | 211,2 | 18,9 | 0,154 | 505  | 5735  | 5922  | 705  | 2000 |
| 205/27                         | 24×3,30 | 7×2,20  | 205 | 26,6 | 231,6 | 19,8 | 0,140 | —    | 6295  | 6500  | 774  | 2000 |
| 240/32                         | 24×3,60 | 7×2,40  | 244 | 31,7 | 275,7 | 21,6 | 0,118 | 605  | 7409  | 7653  | 921  | 2000 |
| 300/39                         | 24×4,00 | 7×2,65  | 301 | 38,6 | 339,6 | 24,0 | 0,096 | 690  | 8935  | 9236  | 1132 | 2000 |
| 330/43                         | 54×2,80 | 7×2,80  | 332 | 43,1 | 375,1 | 25,2 | 0,087 | —    | 10078 | 10575 | 1255 | 2000 |
| 400/51                         | 54×3,05 | 7×3,05  | 394 | 54,1 | 445,1 | 27,5 | 0,073 | 825  | 11766 | 12160 | 1490 | 1500 |
| 450/56                         | 54×3,20 | 7×3,20  | 434 | 56,3 | 490,3 | 28,8 | 0,067 | —    | 12962 | 13396 | 1640 | 1500 |
| 500/64                         | 54×3,40 | 7×3,40  | 490 | 63,5 | 553,5 | 30,6 | 0,059 | 945  | 14628 | 15118 | 1852 | 1500 |
| 550/71                         | 54×3,60 | 7×3,60  | 549 | 71,2 | 620,2 | 32,4 | 0,053 | —    | 16395 | 16944 | 2076 | 1200 |
| 600/72                         | 54×3,70 | 19×2,20 | 580 | 72,2 | 652,2 | 33,2 | 0,050 | 1050 | 17732 | 18312 | 2170 | 1200 |
| 650/79                         | 96×2,90 | 19×2,30 | 634 | 78,9 | 712,9 | 34,7 | 0,046 | —    | 19156 | 20107 | 2372 | 1000 |
| 700/86                         | 96×3,02 | 19×2,40 | 687 | 85,9 | 772,9 | 36,2 | 0,042 | 1220 | 20902 | 21832 | 2575 | 1000 |
| 750/93                         | 96×3,15 | 19×2,50 | 748 | 93,2 | 841,2 | 37,7 | 0,039 | —    | 22633 | 23351 | 2800 | 1000 |
| 800/105                        | 96×3,30 | 19×2,65 | 821 | 105  | 926   | 39,7 | 0,035 | —    | 25118 | 25938 | 3092 | 1000 |
| С отношением А : С = 4,29–4,39 |         |         |     |      |       |      |       |      |       |       |      |      |
| 120/27                         | 30×2,22 | 7×2,20  | 116 | 26,6 | 142,6 | 15,5 | 0,249 | 375  | 4885  | 5117  | 528  | 2000 |
| 150/34                         | 30×2,50 | 7×2,50  | 147 | 34,3 | 181,3 | 17,5 | 0,196 | 450  | 6086  | 6306  | 675  | 2000 |
| 185/43                         | 30×2,80 | 7×2,80  | 185 | 43,1 | 288,1 | 19,6 | 0,156 | 515  | 7652  | 7930  | 846  | 2000 |
| 240/56                         | 30×3,20 | 7×3,20  | 241 | 56,3 | 297,3 | 22,4 | 0,120 | 610  | 9778  | 10019 | 1106 | 2000 |
| 300/66                         | 3×3,50  | 19×2,10 | 288 | 65,8 | 353,8 | 24,5 | 0,100 | 705  | 12191 | 12479 | 1313 | 2000 |
| 400/93                         | 3×4,15  | 19×2,5  | 406 | 93,2 | 499,2 | 29,1 | 0,071 | 850  | 16767 | 17173 | 1851 | 1500 |

| 1  | 2       | 3       | 4    | 5    | 6     | 7    | 8     | 9 | 10    | 11    | 12   | 13   |
|--|---------|---------|------|------|-------|------|-------|---|-------|-------|------|------|
| С отношением А : С = 1,46                            |         |         |      |      |       |      |       |   |       |       |      |      |
| 185/28   | 54×2,10 | 37×2,10 | 187  | 128  | 315   | 23,1 | 0,155 | — | 17649 | 18023 | 1525 | 4000 |
| 300/204  | 54×2,65 | 37×2,65 | 298  | 204  | 502   | 29,2 | 0,097 | — | 27398 | 27845 | 2428 | 3500 |
| 500/336  | 54×3,40 | 61×2,65 | 490  | 336  | 826   | 37,5 | 0,059 | — | 45112 | 45602 | 4005 | 3500 |
| Специальные усиленные с отношением А : С = 0,65–0,95 |         |         |      |      |       |      |       |   |       |       |      |      |
| 70/72  | 18×2,20 | 19×2,2  | 68,4 | 72,2 | 140,6 | 15,4 | 0,420 | — | 9325  | 9462  | 755  | 4000 |
| 95/141   | 24×2,20 | 37×2,20 | 91,2 | 141  | 232,2 | 19,8 | 0,316 | — | 1749  | 17673 | 1357 | 4000 |
| 330/27   | 84×2,22 | 7×2,20  | 325  | 26,6 | 351,6 | 24,4 | 0,089 | — | 8437  | 9087  | 1106 | 2000 |
| 400/22   | 76×2,57 | 7×2,20  | 394  | 22,0 | 416,0 | 26,6 | 0,073 | — | 8910  | 9500  | 1261 | 1500 |
| 500/27   | 76×2,84 | 7×2,20  | 481  | 26,6 | 507,6 | 29,4 | 0,06  | — | 10849 | 11570 | 1537 | 1500 |

Суммарная нагрузка от веса провода с гололедом

$$G_3^p = G_1^p + G_2^p,$$

$c = 15$  мм (табл. 2.5) и  $d = 24$  мм.

$$p_r = \pi \cdot 15 \cdot 0,9 \cdot (24 + 15) \cdot 10^{-3} = 1,653 \text{ даН/м};$$

$$G_2^p = 1,653 \cdot 550 = 909,15 \text{ даН.}$$

$$G_3^p = 622,6 \cdot 909,15 = 1531,75 \text{ даН.}$$

Таблица 2.5

Нормативная толщина стенки гололеда  $c$ , мм,  
для высоты 18 м над поверхностью земли

| Район гололедности | Повторяемость |                |
|--------------------|---------------|----------------|
|                    | 1 раз в 5 лет | 1 раз в 10 лет |
| I                  | 5             | 5              |
| II                 | 5             | 10             |
| III                | 10            | 15             |
| IV                 | 15            | 20             |
| Особый             | 20 и более    | Более 22       |

3. Нормативная горизонтальная нагрузка от давления ветра на провода:

а. При отсутствии гололеда

$$P = n p_v l_{\text{ветр}},$$

где  $p_v$  – давление ветра на 1 м провода, даН/м:

$$p_v = \alpha k_L C_x q_p^H d \sin^2 \varphi \cdot 10^{-3},$$

где  $\alpha = 0,7$  – коэффициент неравномерности распределения ветра по длине пролета;

$k_L = 1$  – коэффициент, учитывающий влияние длины пролета;

$C_x = 1,1$  – коэффициент лобового сопротивления;

$$q_p^H = 80 \cdot 1,173 = 93,84 \text{ даН/м}^2;$$

$\varphi$  – угол между направлением ветра и проводами.  
Скоростной напор ветра  $q^H = 80 \text{ даН/м}^2$  (табл. 2.6).

Таблица 2.6

Нормативные скоростные напоры, даН/м<sup>2</sup>,  
и приближенные скорости ветра, м/с,  
для высоты до 15 м над поверхностью земли

| Ветровой район | Повторяемость |     |                |     |                |     |
|----------------|---------------|-----|----------------|-----|----------------|-----|
|                | 1 раз в 5 лет |     | 1 раз в 10 лет |     | 1 раз в 15 лет |     |
|                | $q$           | $v$ | $q$            | $v$ | $q$            | $v$ |
| I              | 27            | 21  | 40             | 25  | 55             | 30  |
| II             | 35            | 24  | 40             | 25  | 55             | 30  |
| III            | 45            | 27  | 50             | 29  | 55             | 30  |
| IV             | 55            | 30  | 65             | 32  | 80             | 36  |
| V              | 70            | 33  | 80             | 36  | 80             | 36  |
| VI             | 85            | 37  | 100            | 40  | 100            | 40  |
| VII            | 100           | 40  | 125            | 45  | 125            | 45  |

Увеличение напора по высоте

$$q_p^H = q^H k,$$

где  $k$  – коэффициент увеличения скоростных напоров и скоростей ветра по высоте, выбирается путем линейной интерполяции из табл. 2.7 (метод линейной интерполяции см. в математике).

Таблица 2.7

Коэффициенты увеличения скоростных напоров  
и скоростей ветра по высоте

| Зона по высоте, м | Скоростной напор ветра | Скорость ветра |
|-------------------|------------------------|----------------|
| 1                 | 2                      | 3              |
| До 15             | 1,0                    | 1,0            |
| 20                | 1,25                   | 1,12           |
| 40                | 1,55                   | 1,24           |

Окончание табл. 2.7

|            |      |      |
|------------|------|------|
| 1          | 2    | 3    |
| 60         | 1,75 | 1,32 |
| 100        | 2,1  | 1,45 |
| 200        | 2,6  | 1,61 |
| 350 и выше | 3,1  | 1,76 |

Промежуточные значения определяются путем линейной интерполяции.

Все коэффициенты выбираются из табл. 2.8.

Таблица 2.8

Поправочные коэффициенты

|  |          |      |            |             |
|--|----------|------|------------|-------------|
| Длина пролета, м   | До 50    | 100  | 150        | 250 и более |
| $k_L$  | 1,2      | 1,1  | 1,05       | 1           |
| Скоростной напор ветра<br>$q$ , даН/м <sup>2</sup>                 | 27       | 40   | 55         | 76 и более  |
| Коэффициент неравномерности скоростного напора по пролету $\alpha$ | 1        | 0,85 | 0,75       | 0,7         |
| Диаметр проводов и тросов, мм                                      | Менее 20 |      | 20 и более |             |
| Коэффициент лобового сопротивления $C_x$                           | 1,2      |      | 1,1        |             |

При ветре, направленном перпендикулярно линии:

$$P_H^p = 1,2 \cdot 0,7 \cdot 1 \cdot 1,1 \cdot 93,84 \cdot \sin^2 90 \cdot 10^{-3} \cdot 470 = 40,75 \text{ даН.}$$

При ветре, направленном под углом  $\varphi = 45^\circ$ :

$$P_H^p = 1,2 \cdot 0,7 \cdot 1 \cdot 1,1 \cdot 93,84 \cdot \sin^2 45 \cdot 10^{-3} \cdot 470 = 25,47 \text{ даН.}$$

б. С гололедом.  
В этом режиме

$$q_p^H = 0,25q^H,$$

т. е. скоростной напор уменьшается в четыре раза:

$$P = np_r l_{\text{ветр}},$$

где  $n = 1,4$  (табл. 2.9).

Таблица 2.9

Коэффициенты перегрузки в нормальных  
и аварийных режимах

| Наименование нагрузок  | Коэффициенты перегрузки |
|--|-------------------------|
| От собственного веса строительных конструкций, проводов, тросов и оборудования ВЛ                  | 1,1(0,9)*               |
| От веса гололеда на проводах и тросах  | 2,0                     |
| От веса гололеда на конструкции опоры  | 1,3                     |
| От давления ветра на конструкции опор:<br>при наличии гололеда на проводах<br>и тросах             | 1,2                     |
| отсутствия гололеда на проводах<br>и тросах  | 1,0 (1,2)**             |
| От давления ветра на провода и тросы:<br>свободные от гололеда                                     | 1,2                     |
| покрытые гололедом   | 1,4                     |
| Горизонтальные нагрузки от тяжения проводов и тросов, свободных от гололеда или покрытых гололедом | 1,3                     |

\* Значение, указанное в скобках, должно приниматься в случаях, когда уменьшение вертикальной постоянной нагрузки ухудшает условия работы конструкции (например, при расчете анкерных болтов, фундаментов и оснований при выдергивании).

\*\* Значение, указанное в скобках, принимается в случаях учета гололедных отложений на конструкциях опор.

$$p_{\Gamma} = \alpha K_L C_x q_p^H / 4 \cdot (d + 2c) \sin^2 \varphi \cdot 10^{-3} =$$

$$= 1,4 \cdot 0,7 \cdot 1 \cdot 1,2 \cdot 0,25 \cdot 93,84 \cdot (24 + 2 \cdot 15) \cdot \sin^2 90 \cdot 10^{-3} \cdot 470 = 700,2 \text{ даН.}$$

#### 4. Нагрузка от тяжения проводов

$$T_{\max} = F \sigma_3,$$

где  $F$  – площадь поперечного сечения провода:  $F = 339,6 \text{ мм}^2$  (см. табл. 2.4);

$\sigma_3$  – напряжение в проводе при среднегодовой температуре:  $\sigma_3 = 81 \text{ Н/мм}^2$  (см. табл. 2.2);

$$T_{\max} = 8,1 \cdot 339,6 = 2750,8 \text{ даН.}$$

#### Нормативная нагрузка по аварийному режиму

$$T_{\text{н}}^{\text{п}} = b T_{\max},$$

где  $b$  – коэффициент нормативной нагрузки:  $b = 0,4$  (см. табл. 2.10).

$$T_{\text{н}}^{\text{п}} = 0,4 \cdot 2750,8 = 1100,3 \text{ даН.}$$

Таблица 2.10

#### Коэффициент нормативной нагрузки и понижающий коэффициент

| Сечение провода и троса, мм | Коэффициент нормативной нагрузки $b$ | Число проводов в фазе | Понижающий коэффициент $K$ |
|-----------------------------|--------------------------------------|-----------------------|----------------------------|
| 240 и выше                  | 0,4                                  | 1                     | 1                          |
| 185 и выше                  | 0,5                                  | 2                     | 0,8                        |
|                             |                                      | 3                     | 0,7                        |
|                             |                                      | 4                     | 0,6                        |

5. Для данного напряжения линии применяется трос марки С-70 массой  $G = 0,623$  кг/м, площадь поперечного сечения равна  $72,6$  мм<sup>2</sup>, диаметр 11 мм (табл. 2.11).

Таблица 2.11

Стальные канаты (по ГОСТ 3062–69, 3063–66, 3064–55)

| Марка троса             | Число и диаметр проволок, шт. × мм | Диаметр каната, мм | Площадь сечения, мм <sup>2</sup> | Масса каната $G$ , кг/м | Разрывное усилие каната * $R$ , даН |
|-------------------------|------------------------------------|--------------------|----------------------------------|-------------------------|-------------------------------------|
| С-35                    | 1×2,8<br>6×2,6                     | 8                  | 38,01                            | 0,330                   | 4890                                |
| С-50                    | 1×1,9<br>18×1,8                    | 9,1                | 46,64                            | 0,4175                  | 6120                                |
| С-70<br>(220 кВ и выше) | 1×2,3<br>18×2,2                    | 11                 | 72,58                            | 0,623                   | 9135<br>(7839)                      |
| –                       | 1×1,9<br>36×1,8                    | 12,5               | 94,44                            | 0,806                   | 11200                               |
| –                       | 1×2,1<br>36×2,0                    | 14                 | 116,56                           | 0,9945                  | 13650                               |
| –                       | 1×2,3<br>36×2,2                    | 15,5               | 141                              | 1,205                   | 16700                               |
| –                       | 1×2,5<br>36×2,4                    | 17                 | 167,77                           | 1,435                   | 19900                               |
| –                       | 1×2,8<br>36×2,6                    | 18,5               | 197,29                           | 1,685                   | 23450                               |
| –                       | 1×3,2<br>36×3,0                    | 21                 | 262,51                           | 2,24                    | 31200                               |

\* Значение, указанное в скобках, при  $120$  кгс/мм<sup>2</sup>, для канатов из проволоки с временным сопротивлением разрыву –  $140$  кгс/мм<sup>2</sup>.

Как правило, в качестве грозозащитных тросов на ВЛ 35 кВ применяются канаты 8,0-Н-120-1-СС ГОСТ 3062–69, на ВЛ 110 и 150 кВ – канаты 9.1-Г-1-СС-Н-140 ГОСТ 3063–66, на ВЛ напряжением 220 кВ и выше – канаты 11,0-Г-Г-СС-Н-140 ГОСТ 3063–66.

Расчет троса аналогичен расчету провода.  
Нагрузка от собственного веса троса

$$G_1^p = 0,623 \cdot 550 = 342,65 \text{ даН (с учетом } n = 1,1).$$

$$G_p = 1,1 \cdot 342,65 = 376,9 \text{ даН.}$$

6. Нормативная нагрузка от гололеда на тросе

$$P_T = \pi \cdot 15 \cdot 0,9 \cdot (11 + 15) \cdot 10^{-3} = 1,102 \text{ даН/м;}$$

$$G_2^p = 1,103 \cdot 550 = 606,18 \text{ даН;}$$

$$G_3^p = 342,65 + 606,65 = 948,8 \text{ даН.}$$

С учетом  $n = 2$

$$G_T^p = 2 \cdot 948,8 = 1897,6 \text{ даН.}$$

7. Нормативная горизонтальная нагрузка от давления ветра на трос:

а) при отсутствии гололеда:

$$\varphi = 90^\circ$$

$$P_T^p = 1,2 \cdot 0,7 \cdot 1 \cdot 1,2 \cdot 98,24 \cdot 11 \cdot \sin^2 90 \cdot 10^{-3} \cdot 470 = 512,0 \text{ даН,}$$

$$\varphi = 45^\circ$$

$$P_T^p = 1,2 \cdot 0,7 \cdot 1 \cdot 1,2 \cdot 96,24 \cdot 11 \cdot \sin^2 45 \cdot 10^{-3} \cdot 470 = 250,7 \text{ даН;}$$

б) с гололедом

$$P_T^p = 1,4 \cdot 0,7 \cdot 1 \cdot 1,2 \cdot 96,24 \cdot 0,25 \cdot \sin^2 90 \cdot 10^{-3} \cdot 470 \cdot (11 + 2 \cdot 15) = 550,7 \text{ даН.}$$

8. Нагрузка от тяжения троса

$$T_{\max} = F \sigma_3 = 72,6 \cdot 62 = 4501 \text{ даН,}$$

где  $F = 72,6 \text{ мм}^2$  – площадь поперечного сечения троса,  $\text{мм}^2$ ;

$\sigma_3$  – напряжение в тросе при наибольшей нагрузке и низшей температуре,  $\sigma_3 = 62 \text{ даН/мм}^2$  (см. табл. 2.2).

При аварийном режиме  $T_T^P = 0,5T_{\max}$ .

С учетом понижающего коэффициента 0,8 (для промежуточных опор) и  $n = 1,3$

$$T_T^P = 0,5 \cdot 1,3 \cdot 0,8 \cdot 4501 = 2340,6 \text{ даН.}$$

9. Нагрузка от веса гирлянды изоляторов с учетом  $n = 1,1$

$$G_T^P = 1,1 \cdot 67,0 = 73,7 \text{ даН,}$$

где 67,0 кг – вес гирлянды изоляторов.

Расчетные нагрузки на опоры от проводов и троса сведены в табл. 2.12.

Таблица 2.12

Расчетные нагрузки на опоры от проводов и троса

| Наименование нагрузки           | Обозначение | Нормальный режим. Ветер без гололеда, направлен перпендикулярно оси линии | Нормальный режим. Ветер с гололедом, направлен под углом 45° к оси линии | Нормальный режим. Ветер с гололедом, направлен перпендикулярно оси линии | Аварийный режим. Обрыв крайней фазы. Гололеда и ветра нет | Аварийный режим. Обрыв троса. Гололеда и ветра нет |
|---------------------------------|-------------|---|--|--|---|--|
| Вес провода, даН                | $G^P$       | 684,86  | 684,86   |  | 684,86  | 684,86   |
| Вес троса, даН                  | $G^P$       | 379,9   | 379,9  |  | 379,9   | 379,9  |
| Вес провода с гололедом, даН    | $G_n^P$     |   |  | 3064,6   |   |  |
| Вес троса с гололедом, даН      | $G_T^P$     |   |  | 1897,6   |   |  |
| Вес гирлянды изоляторов, даН    | $G_T$       | 73,7  | 73,7   | 73,7   | 73,7  | 73,7   |
| Давление ветра на провод, даН   | $P_n^P$     | 40,75   | 25,47  | 700,2  |   |  |
| Давление ветра на трос, даН     | $P_T^P$     | 512   | 256  | 545,2  |   |  |
| Тяжение провода при обрыве, даН | $T_n^P$     |   |  |  | 1144,3  |  |
| Тяжение троса при обрыве, даН   | $T_T^P$     |   |  |  |   | 2340,6   |

## 2.2. Расчет ветровой нагрузки на конструкцию опоры

Перед расчетом ветровой нагрузки на конструкцию опоры вычертить эскиз опоры, одновременно сделав самостоятельно выбор расположения раскосов и других элементов опоры, определив их размеры и проставив на эскизе (см. рис. 2.1).

**Определение ветровой нагрузки на конструкции опоры.** В соответствии с требованиями норм при расчете пространственных конструкций рассматривают два направления ветра:

- а) перпендикулярно оси линии;
- б) под углом  $45^\circ$  к оси линии.

Ветровую нагрузку на решетчатую пространственную конструкцию, когда ветер направлен перпендикулярно оси линии, т. е. к боковой грани опоры, вычисляют по формуле

$$W_{\perp}^p = n C_t q^H \beta A_k,$$

где  $n = 1,2$  – коэффициент перегрузок;

$C_t$  – аэродинамический коэффициент;

$Q^H$  – нормативный скоростной напор ветра;

$\beta = 1,5$  – коэффициент динамичности, учитывающий порывы ветра для стальных опор высотой до 40 м (для опор башенного типа 1,6; свободностоящих порталных опор 1,6; для опор на оттяжках 1,65);

$A_k$  – площадь проекции конструкции или ее части по наружному обмеру с наветренной стороны на плоскость, перпендикулярную направлению ветра.

При ветре, направленном под углом  $45^\circ$  к оси линии (рис. 2.2), нагрузки, действующие на перпендикулярные грани ствола:

$$W_X^p = W_Y^p = 0,8 W_{\perp}^p,$$

где  $W_{\perp}^p$  – расчетная нагрузка при действии ветра на наиболее широкую грань.

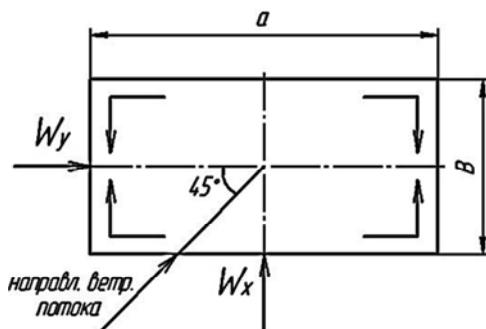


Рис. 2.2. Схема к расчету нагрузки при ветре, направленном под углом 45°

Ветровую нагрузку на траверсы сначала вычисляем в предположении действия ветра перпендикулярно плоскости траверсы, а затем с помощью коэффициентов вычисляем по следующим формулам.

При ветре, направленном под углом 45 к оси линии (рис. 2.3):

$$W_{\text{тр}X}^P = 0,65W_{\perp}^P,$$

$$W_{\text{тр}Y}^P = 0,45W_{\perp}^P.$$

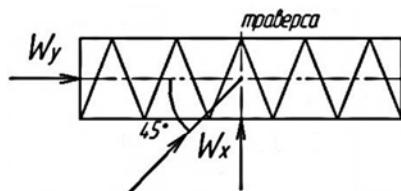


Рис. 2.3. Схема к расчету ветровой нагрузки на траверсу (ветер направлен под углом 45°)

При ветре, направленном перпендикулярно оси линии (рис. 2.4):

$$W_{\text{тр}}^P = 0,45W_{\perp}^P.$$

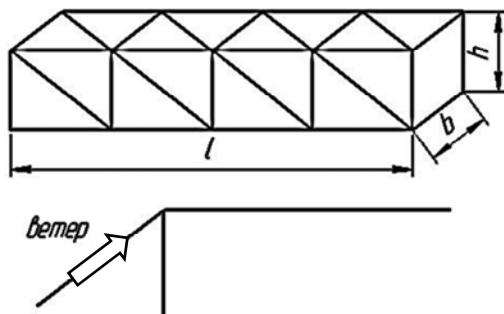


Рис. 2.4. Схема к расчету ветровой нагрузки (ветер направлен перпендикулярно оси линии)

Скоростной напор ветра возрастает с увеличением высоты.

Определяем его путем умножения на поправочные коэффициенты из табл. 2.7.

Аэродинамический коэффициент  $C_t$  определяем из СНиП 2.01.07–85.

$C_t$  относится к площади контура наветренной грани:

$$C_t = C_x(1 + \eta)K_1,$$

где коэффициент  $K_1$  равен

|   |   | $K_1$ |
|---|---|-------|
| → | □ | 1,0   |
| → | ▴ | 0,9   |
| → | ◇ | 1,2   |

$$C_x = 1/A_k \sum C_{xi} A_i,$$

где  $C_{xi}$  – аэродинамический коэффициент  $i$ -го элемента конструкции, для профилей  $C_{xi} = 1,4$ ;

$A_i$  – площадь проекции  $i$ -го элемента на плоскость конструкции;

$A_k$  – площадь, ограниченная контуром конструкции.

Коэффициент заполнения

$$\varphi = \frac{\sum A_i}{A_k} \leq 0,8.$$

Ветровую нагрузку следует относить к площади, ограниченной контуром  $A_k$ . Направление оси  $X$  совпадает с направлением ветра и перпендикулярно плоскости конструкции.

$\eta$  определяем из табл. 2.13.

Таблица 2.13

Значения коэффициента  $\eta$  для ферм

| $\varphi$ | Значения $\eta$ для ферм из профилей при $b/h$ , равном |      |      |      |      |
|-----------|---|------|------|------|------|
|           | 1/2   | 1    | 2    | 4    | 6    |
| 0,1       | 0,93  | 0,99 | 1    | 1    | 1    |
| 0,2       | 0,75  | 0,81 | 0,87 | 0,90 | 0,93 |
| 0,3       | 0,56  | 0,65 | 0,73 | 0,78 | 0,83 |
| 0,4       | 0,38  | 0,48 | 0,59 | 0,65 | 0,72 |
| 0,5       | 0,19  | 0,32 | 0,44 | 0,52 | 0,61 |
| 0,6       | 0   | 0,15 | 0,30 | 0,40 | 0,50 |

*Верхняя траверса*

Площадь, ограниченная контуром траверсы (рис. 2.5):

$$A_k = 0,5 \cdot 1 \cdot 2,925 = 1,463 \text{ м}^2.$$

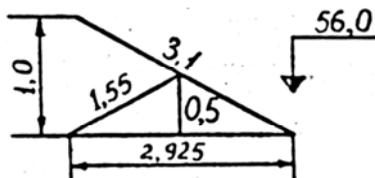


Рис. 2.5. Расчетная схема траверсы

При расчете площади элементов фермы необходимо учесть, что вся опора выполнена из уголков. Причем при расчете ветровой нагрузки учитывается только одна грань уголка:

$$A_i = \sum b_i l_i,$$

где  $b_i$  – ширина одной из граней  $i$ -го уголка;

$l_i$  – длина  $i$ -го уголка.

В нашем случае

$$A_i = 0,06 \cdot (0,5 + 1,55) + 0,06 \cdot (2,925 + 3,1) = 0,503 \text{ м}^2.$$

Угол разработчик выбирает самостоятельно, из конструктивных соображений. Коэффициент заполнения

$$\varphi = 0,503/1,463 = 0,344.$$

$$C_x = 1,4 \cdot 0,344 = 0,481.$$

При  $b/h = 1$   $\eta = 0,65$ .

Аэродинамический коэффициент

$$C_t = 0,481 \cdot (1 + 0,65) \cdot 1 = 0,794.$$

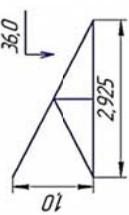
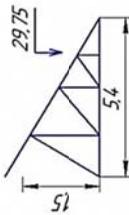
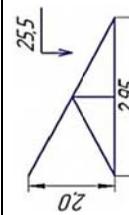
Отсюда

$$W_{\perp}^p = 1,2 \cdot 0,794 \cdot 119,8 \cdot 1,5 \cdot 1,463 = 250,5 \text{ даН.}$$

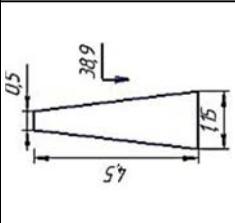
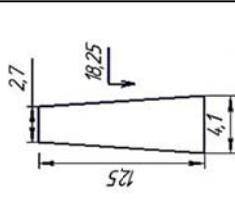
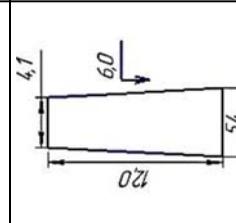
Определение ветровой нагрузки на конструкцию опоры выполнено в табличной форме (табл. 2.14).

Таблица 2.14

## Определение ветровой нагрузки на опору

| Наименование секции | Эскиз и средняя отметка секции, м   | Коэффициент увеличения скорости порыва по высоте | Нормативный скоростной напор $q_p^A = q^H k$ , даН/м <sup>2</sup> | Площадь элементарной фермы $A_1$ , м <sup>2</sup> | Площадь контура фермы $A_k$ , м <sup>2</sup> | Коэффициент заполнения $\varphi$ | Аэродинамический коэффициент для плоской фермы $C_x$ | $\eta$ при $b/h = 1$ | Аэродинамический коэффициент пространных фермы $C_f$ | Расчетная ветровая нагрузка, даН |   |   |         |
|---------------------|---|--|---|---|--|----------------------------------|--|----------------------|--|----------------------------------|---|---|---------|
|                     |   |  |   |   |  |                                  |  |                      |  | $W_{\perp}^p$                    | при ветре, направленном перпендикулярно оси $W_{\perp}^p$ | при ветре, направленном под углом 45° к оси линии | $W_x^p$ |
| 1                   | 2   | 3  | 4   | 5   | 6  | 7                                | 8  | 9                    | 10   | 11                               | 12  | 13  | 14      |
| Верхняя траверса    |  | 1,497  | 119,8   | 0,503   | 1,463  | 0,44                             | 0,461  | 0,65                 | 0,794  | 250,5                            | 192,8   | 134,0   | 92,8    |
| Средняя траверса    |  | 1,4  | 112   | 1,23  | 4,05   | 0,304                            | 0,426  | 0,64                 | 0,698  | 569,9                            | 256,5   | 370,2   | 256,5   |
| Нижняя траверса     |  | 1,32   | 105,6   | 0,473   | 2,95   | 0,15                             | 0,224  | 0,9                  | 0,426  | 238,9                            | 107,5   | 159,3   | 107,5   |

Окончание табл. 2.14

| 1                           | 2   | 3    | 4   | 5     | 6    | 7     | 8     | 9    | 10    | 11     | 12     | 13     | 14     |
|-----------------------------|---|------|-----|-------|------|-------|-------|------|-------|--------|--------|--------|--------|
| Тро-<br>со-<br>стой-<br>ка  |  | 1,55 | 124 | 1,07  | 3,96 | 0,27  | 0,378 | 0,7  | 0,643 | 568,3  | 568,3  | 454,6  | 454,6  |
| Сред-<br>няя<br>сек-<br>ция |  | 1,15 | 92  | 4,585 | 37,2 | 0,123 | 0,172 | 0,86 | 0,32  | 1971,3 | 1971,3 | 1577   | 1577   |
| Ниж-<br>няя<br>сек-<br>ция  |  | 1    | 80  | 7,924 | 55,2 | 0,132 | 0,185 | 0,94 | 0,359 | 2853,6 | 2853,6 | 2282,9 | 2282,9 |

### 2.3. Определение усилий в поясах ствола опоры

Так как по своей длине каждая секция имеет пояса одного и того же профиля, то для определения размера профиля достаточно найти усилия в нижней секции панели.

Усилия в поясах при ветре, направленном под углом  $45^\circ$  к оси линии, определяем по формуле

$$U_m = \frac{\sum M_{mx}^p}{2b_{mx} \cos \gamma} + \frac{\sum M_{my}^p}{2b_{my} \cos \gamma} + \frac{\sum G_m^p}{2 \cos^2 \gamma},$$

где  $b_{mx}$  – база в рассматриваемом сечении;

$\sum M_{mx}^p$  – суммарный изгибающий момент в расчетных сечениях от нагрузок, перпендикулярных оси линии;

$\sum M_{my}^p$  – суммарный изгибающий момент в расчетном сечении от нагрузок, направленных вдоль оси линии;

$\sum G_m^p$  – суммарный вес всех элементов выше расчетного сечения.

Если ветер направлен перпендикулярно оси линии, то

$$\sum M_{my}^p = 0.$$

Так будет в нашем случае.

Суммарные изгибающие моменты, подсчитанные на всю опору, воспринимаются двумя параллельными гранями опоры и поэтому делятся на 2. По этой же причине вес, подсчитанный для всей опоры, разделен на 4.

Как показали предварительные расчеты, для верхней секции и тросостойки расчетным является нормальный режим при ветре с гололедом. Расчетную ветровую нагрузку на конструкцию при ветре с гололедом, направленном перпендикулярно оси линии, определяем на основании расчетов ветровой нагрузки без гололеда с учетом различных коэффициентов перегрузки по формуле

$$W_{\text{гол}}^p = \frac{W_{\text{пер}}^p}{4 \cdot 1,2} = 0,208 W_{\text{пер}}^p.$$

Значения нагрузок от ветра при гололеде сводим в табл. 2.15.

Таблица 2.15

Нагрузка на конструкцию при ветре с гололедом

| Верхняя траверса | Средняя траверса | Нижняя траверса | Тросостойка | Верхняя секция | Средняя секция | Нижняя секция | Всего |
|------------------|------------------|-----------------|-------------|----------------|----------------|---------------|-------|
| 19,3             | 53,4             | 22,4            | 118,2       | 415,7          | 410            | 593,5         | 163,5 |

Определяем суммарные изгибающие моменты в расчетных сечениях.

**Тросостойка.** Расчетный режим при ветре с гололедом.

$$\sum M_{\text{тх}}^{\text{р}} = \frac{1}{2} W_{\text{тс}} h_{\text{тс}} + p_{\text{т}}^{\text{р}} h_{\text{тс}} + G_{\text{т}}^{\text{р}} l_{\text{трост}}^{\text{вылета}}$$

где  $W_{\text{тс}}$  – нагрузка от ветра при гололеде на тросостойку;

$h_{\text{тс}}$  – высота тросостойки;

$p_{\text{т}}^{\text{р}}$  – нагрузка от ветра на трос;

$G_{\text{т}}^{\text{р}}$  – вес троса с гололедом.

В общем случае

$$M = Hd,$$

где  $H$  – нагрузка, действующая на какую-то рассматриваемую часть опоры;

$d$  – плечо действия силы.

Точка, относительно которой рассматривается действие момента, лежит на пересечении центральной оси опоры с линией, вдоль которой делается сечение опоры. Для тросостойки это линия сечения  $l-l$ .

$$\sum M_{\text{тс}}^{\text{р}} = \frac{1}{2} 118,2 \cdot 4,5 + 1898,6 \cdot 0,386 + 556,6 \cdot 4,5 = 3,5 \cdot 10^3 \text{ даН}\cdot\text{м.}$$

*Верхняя секция.* Расчетный режим тот же.

$$\begin{aligned} \sum M_{1X}^P &= W_{тс} h_{1тс} + W_{1с} h_{11с} + 2W_{1тр} h_{11тр} + 2W_{2тр} h_{12тр} + p_{т}^P h_{т} + \\ &+ 2P_{п}^P (h_{п1} - S) + 2P_{п}^P (h_{п2} - S) + G_{т}^P l_{тросост}^{вЫЛета} + 2G_{п}^P l_{1тр}^{вЫЛ} + 2G_{п}^P l_{2тр}^{вЫЛ} = \\ &= 118,2 \cdot 14,25 + 415,7 \cdot 6 + 2 \cdot 19,3 \cdot 11,5 + 2 \cdot 53,4 \cdot 5,25 + 545,2 \cdot 16,5 + \\ &+ 2 \cdot 700,2 \cdot (11 - 2,3) + 2 \cdot 700,2 \cdot (4,5 - 2,3) + 1897,6 \cdot 0,386 + \\ &+ 2 \cdot 3064,6 \cdot 3,5 + 2 \cdot 3064,6 \cdot 6,4 = 90,85 \cdot 10^3 \text{ даН} \cdot \text{м}. \end{aligned}$$

$S$  – длина гирлянды изоляторов.

*Средняя секция.* Расчетный режим при ветре без гололеда.

$$\begin{aligned} \sum M_{2X}^P &= W_{тс} h_{2тс} + W_{1с} h_{21с} + W_{2с} h_{22с} + 2W_{1тр} h_{21тр} + 2W_{2тр} h_{22тр} + \\ &+ 2W_{3тр} h_{23тр} + P_{т}^P h_{21} + 2P_{п}^P (h_{п1} + h_{п2} + h_{п3} - 3S) + G_{т}^P l_{тросост}^{вЫЛета} + \\ &+ 2G_{п}^P (l_{1тр}^{вЫЛ} + l_{2тр}^{вЫЛ} + l_{3тр}^{вЫЛ}) = 568,3 \cdot 26,75 + 1998,7 \cdot 18,5 + 1971,3 \cdot 6,25 + \\ &+ 2 \cdot 92,8 \cdot 24 + 2 \cdot 256,5 \cdot 17,75 + 2 \cdot 107,5 \cdot 11,5 + 512 \cdot 29 + 2 \cdot 684,8 \times \\ &\times (3,5 + 6,4 + 4,2) = 105,6 \cdot 10^3 \text{ даН} \cdot \text{м}. \end{aligned}$$

*Нижняя секция.* Расчетный режим тот же.

$$\begin{aligned} \sum M_{3X}^P &= W_{тс} h_{тс} + W_{1с} h_{31с} + W_{2с} h_{32с} + W_{3с} h_{33с} + 2W_{1тр} h_{31тр} + \\ &+ 2W_{2тр} h_{32тр} + 2W_{3тр} h_{33тр} + p_{т}^P h_{3т} + 2P_{п}^P (h_{п1} + h_{п2} + h_{п3} - 3S) + \\ &+ G_{т}^P l_{тросост}^{вЫЛета} + 2G_{п}^P (l_{1тр}^{вЫЛ} + l_{2тр}^{вЫЛ} + l_{3тр}^{вЫЛ}) = 568,3 \cdot 38,75 + 1998,7 \cdot 30,5 + \\ &+ 1971,3 \cdot 18,25 + 2853,6 \cdot 6 + 2 \cdot 92,8 \cdot 36 + 2 \cdot 256,5 \cdot 29,75 + \\ &+ 2 \cdot 107,5 \cdot 13,5 + 512 \cdot 41 + 2 \cdot 978 \cdot (35,5 + 29 + 22,5 - 6,9) + \\ &+ 379,9 \cdot 0,386 + 2 \cdot 684,86 \cdot (3,5 + 6,4 + 4,2) = 201,8 \cdot 10^3 \text{ даН} \cdot \text{м}. \end{aligned}$$

Расчетный вес опоры на основании предварительных расчетов с учетом  $n = 1,1$  будет

$$G_k^p = 1,1 \cdot 450 = 495 \text{ даН.}$$

Расчетный вес погонного метра опоры

$$\frac{495}{41} = 12,07 \text{ даН/м.}$$

Расчетная база в сечении  $I-I$ :

$$b_T = 1,15 \text{ м, } \cos \gamma = 0,997.$$

$$\sum G_{TP}^p = 173 \cdot 4,5 + 1898,6 = 2,677 \cdot 10^3 \text{ даН.}$$

$$U_{TP} = \frac{M_{Tx}^p}{2b_T \cos \gamma} + \frac{G_{TP}^p}{4 \cos^2 \gamma} = \frac{3,5}{2 \cdot 1,15 \cdot 0,997} + \frac{2,677}{4 \cdot 0,997^2} = 2,2 \cdot 10^3 \text{ даН;}$$

$$\sum G_1^p = 173 \cdot 16,5 + 1898,6 + 4 \cdot 3064,6 = 17,009 \cdot 10^3 \text{ даН.}$$

При  $b_1 = 2,6 \text{ м, } \cos \gamma = 0,998$

$$U_1 = \frac{90,85}{2 \cdot 2,6 \cdot 0,998} + \frac{17,009}{4 \cdot 0,998^2} = 21,775 \cdot 10^3 \text{ даН;}$$

$$\sum G_2^p = 173 \cdot 29 + 379,9 + 6 \cdot 684,86 = 9,51 \cdot 10^3 \text{ даН.}$$

При  $b_2 = 4,1 \text{ м, } \cos \gamma = 0,998$

$$U_2 = \frac{105,5}{2 \cdot 2,1 \cdot 0,998} + \frac{9,51}{4 \cdot 0,998^2} = 27,556 \cdot 10^3 \text{ даН;}$$

$$\sum G_3^p = 173 \cdot 41 + 379,9 + 6 \cdot 684,86 = 11,582 \cdot 10^3 \text{ даН.}$$

При  $b_1 = 5,4 \text{ м}$ ,  $\cos \gamma = 0,998$

$$U_1 = \frac{201,8}{2 \cdot 5,4 \cdot 0,998} + \frac{11,582}{4 \cdot 0,998^2} = 21,63 \cdot 10^3 \text{ даН.}$$

В рассматриваемом случае нагрузка при давлении ветра под углом  $45^\circ$  к оси линии оказалась нерасчетной вследствие того, что ветровая нагрузка на конструкцию опоры составляет 50 % суммарной нагрузки на опору.

#### 2.4. Определение усилий в раскосах ствола опоры

Для раскосов в рассматриваемом случае, как в большинстве случаев расчета промежуточных опор, расчетным является аварийный режим – обрыв троса или обрыв провода. Действие крутящего момента при расчете заменяют действием двух пар сил, которые приложены непосредственно к граням опоры.

Как видно из схемы совместного действия тяжения  $T$  и пар сил  $T_{кр}$ , заменяющих крутящий момент, в одной из граней силы  $T/2$  и  $T_{кр}$  (рис. 2.6) складываются, эта грань и является расчетной.

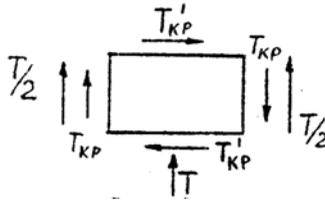


Рис. 2.6. Схема действия сил на гранях опоры

Для определения усилия в раскосах от поперечной силы удобнее использовать формулу, по которой определяются усилия в нисходящих раскосах.

При расчете раскосов необходимо учитывать схему решетки.

Для треугольной схемы решетки (рис. 2.7) применяется следующая формула расчета усилий в раскосах:

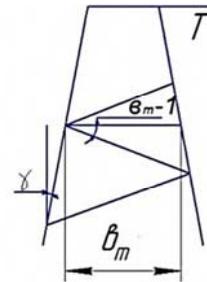


Рис. 2.7. Треугольная схема решетки

$$D_{m-1} = \frac{\cos \gamma}{2 \cos(\beta_{m-1} - \gamma)} \cdot \left( \frac{M_{\text{кр}}}{b_{m1}} + \frac{T_{b0}}{b_m} \right). \quad (2.1)$$

Для перекрестной схемы решетки (рис. 2.8) применяется формула

$$D_m = \frac{1}{4\beta_m \cos \beta_m} \cdot (M_{\text{кр}} + T_{b0}), \quad (2.2)$$

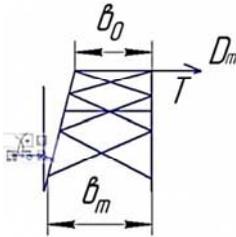


Рис. 2.8. Перекрестная схема решетки

где  $b_0$  – условная база сечения, соответствующая отметке приложения силы  $T$ . Если эта сила приложена в пределах сечения, то база  $b_0$  – реальный размер. Если сила приложена выше сечения с заданным постоянным наклоном пояса, то база  $b_0$  – воображаемый размер, вычисляемый или определяемый построением путем продления направления поясов секций до отметки, на которой действует сила.

Углы  $\beta_{m-1}$  и  $\beta_m$  измеряются на правом или левом поясе, но всегда для нисходящего раскоса.

$\beta_m$  – база в рассматриваемом сечении исследуемой грани;

$\beta_{m\perp}$  – база в том же сечении, но на грани, перпендикулярной исследуемой грани.

Все углы и базы берутся из расчетного эскиза опоры, который выполняется в п. 2.2. Сила  $T$  берется из табл. 2.12.

Определяем усилия в раскосах тросостойки. Расчетным является режим обрыва троса.

$$b_m = 0,5, \quad \beta_{m\perp} = 0,5, \quad \gamma = 4^\circ,$$

$$\cos \gamma = 0,997, \quad b_0 = 0,5, \quad \beta_{m-1} = 45^\circ,$$

$$M_{\text{кр}}^p = Td,$$

где  $d$  – плечо силы или длина вылета тросостойки ( $D_1 - D_2$ ).

При расчете раскосов  $D_3$ – $D_{12}$ ,  $d$  – длина вылета верхней траверсы;  $D_{13}$ – $D_{27}$ ,  $d$  – длина вылета средней траверсы;  $T$  – тяжение троса при обрыве (см. табл. 2.12).

$$M_{кр}^p = 2,257 \cdot 0,389 = 0,88 \cdot 10^3 \text{ даН} \cdot \text{м};$$

$$T_{b0} = 2,257 \cdot 0,5 = 1,129 \cdot 10^3 \text{ даН} \cdot \text{м}.$$

Тогда по формуле (2.1)

$$D_1 = \frac{0,997}{2 \cos(45^\circ - 4^\circ)} \cdot \left( \frac{1,129}{0,5} + \frac{0,87}{0,5} \right) = 2,64 \cdot 10^3 \text{ даН}.$$

Для удобства определения усилий в раскосах расчет производим в табличной форме (табл. 2.16). Расчетным режимом для раскосов  $D_1$ – $D_7$  является обрыв троса. Расчетным режимом для раскосов  $D_8$ – $D_{12}$  является обрыв провода на верхней траверсе, а расчетным режимом для раскосов  $D_{13}$ – $D_{27}$  является обрыв провода средней траверсы. Для одноцепных опор для раскосов нижней и средней секции берется обрыв провода той траверсы, действие крутящего момента от которой будет большим.

Таблица 2.16

### Вычисление усилий в раскосах

| Обозначение раскоса | База символа в сечении |              | Угол нисходящего раскоса | $\frac{\cos \gamma}{2 \cos(\beta_m - \gamma)}$<br>или<br>$\frac{1}{4b_m \cos \beta_m}$ | $M_{кр}$ | $T_{b0}$ | Усилие в раскосе $D_m \cdot 10^3$ , даН |
|---------------------|------------------------|--------------|--------------------------|--|----------|----------|---|
|                     | $b_m$                  | $b_{m\perp}$ |                          |  |          |          |   |
| 1                   | 2                      | 3            | 4                        | 5  | 6        | 7        | 8                                       |
| $D_1$               | 0,5                    | 0,5          | 45                       | 0,661  | 0,87     | 1,129    | 2,64                                    |
| $D_2$               | 0,6                    | 0,6          | 45                       | 0,661  | 0,87     | 1,129    | 2,184                                   |
| $D_3$               | 0,7                    | 0,7          | 42                       | 0,633  | 0,87     | 1,129    | 1,792                                   |

| 1        | 2    | 3    | 4  | 5     | 6      | 7     | 8      |
|----------|------|------|----|-------|--------|-------|--------|
| $D_4$    | 0,85 | 0,85 | 40 | 0,617 | 0,87   | 1,129 | 1,439  |
| $D_5$    | 0,95 | 0,95 | 38 | 0,602 | 0,87   | 1,129 | 1,256  |
| $D_6$    | 1,08 | 1,08 | 34 | 0,576 | 0,87   | 1,129 | 1,057  |
| $D_7$    | 1,2  | 1,2  | 38 | 0,602 | 0,87   | 1,129 | 0,944  |
| $D_8$    | 1,3  | 1,3  | 40 | 0,622 | 12,516 | 4,649 | 8,213  |
| $D_9$    | 1,45 | 1,3  | 39 | 0,614 | 12,516 | 4,649 | 7,88   |
| $D_{10}$ | 1,6  | 1,4  | 38 | 0,607 | 12,516 | 4,649 | 7,19   |
| $D_{11}$ | 1,65 | 1,45 | 36 | 0,593 | 12,516 | 4,649 | 6,789  |
| $D_{12}$ | 1,8  | 1,5  | 37 | 0,6   | 12,516 | 4,649 | 6,556  |
| $D_{13}$ | 2    | 1,6  | 34 | 0,58  | 22,886 | 7,152 | 10,370 |
| $D_{14}$ | 2,1  | 1,65 | 33 | 0,574 | 22,886 | 7,152 | 9,916  |
| $D_{15}$ | 2,3  | 1,75 | 32 | 0,569 | 22,886 | 7,152 | 9,211  |
| $D_{16}$ | 2,4  | 1,8  | 36 | 0,593 | 22,886 | 7,152 | 9,307  |
| $D_{17}$ | 2,65 | 1,95 | 35 | 0,586 | 22,886 | 7,152 | 8,459  |
| $D_{18}$ | 2,9  | 2,05 | 33 | 0,574 | 22,886 | 7,152 | 7,824  |
| $D_{19}$ | 3,1  | 2,1  | 31 | 0,564 | 22,886 | 7,152 | 7,448  |
| $D_{20}$ | 3,3  | 2,25 | 29 | 0,554 | 22,886 | 7,152 | 6,836  |
| $D_{21}$ | 3,6  | 2,4  | 27 | 0,545 | 22,886 | 7,152 | 6,28   |
| $D_{22}$ | 3,8  | 2,5  | 26 | 0,541 | 22,886 | 7,152 | 5,971  |
| $D_{23}$ | 4,1  | 2,6  | 25 | 0,537 | 22,886 | 7,152 | 5,664  |
| $D_{24}$ | 4,3  | 2,7  | 24 | 0,533 | 22,886 | 7,152 | 5,404  |
| $D_{25}$ | 4,65 | 2,8  | 23 | 0,53  | 22,886 | 7,152 | 5,147  |
| $D_{26}$ | 4,85 | 2,95 | 22 | 0,527 | 22,886 | 7,152 | 4,866  |
| $D_{27}$ | 5,1  | 3,1  | 21 | 0,524 | 22,886 | 7,152 | 4,603  |

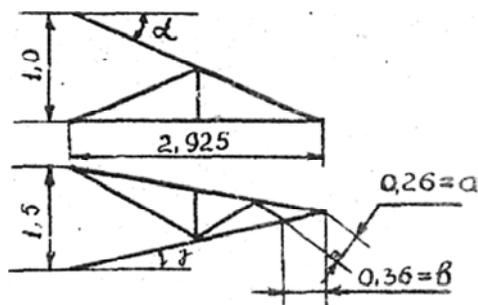
Раскосы  $D_8$ – $D_{27}$  считаются по формуле (2.2), так как в нашем случае схема решетки перекрестная.

Следует отметить, что на промежуточных двухцепных опорах грозозащитный трос закрепляется в центре тросостойки, т. е. длина  $l$  вылета тросостойки равна 0. На одноцепных опорах грозозащитный трос с помощью кронштейнов крепится сбоку и длина  $l$  вылета тросостойки будет иметь определенное значение. В нашем примере трос умышленно смещен в сторону для того, чтобы показать более полный пример расчета.

## 2.5. Определение усилий в стержнях траверсы

### Верхняя траверса

Расчетная схема представлена на рис. 2.9.



$$\alpha = 18^\circ, \gamma = 11^\circ$$

Рис. 2.9. Схема для расчета верхней траверсы

Находим усилие в поясе. Расчетный режим – обрыв провода. По формулам геометрии (приблизительно) находим объем каркаса всех элементов опоры. Разделив вес опоры (см. табл. 2.1) на этот объем, получим вес  $1 \text{ м}^3$  опоры  $\rho$ . Далее, умножая объем отдельных элементов на  $\rho$  и на коэффициент перегрузки  $n = 1,1$ , получим массу отдельных элементов. Вес траверсы, полученный таким образом, будет  $G_{\text{мл}}^{\text{P}} = 0,103 \cdot 10^3$  даН. Расчетный вес монтажной линии

$$G_{\text{мл}}^{\text{P}} = nG_{\text{мл}},$$

где  $n = 1,3$ ;

$G_{\text{мл}}$  выбирается из табл. 2.17.

Расчетный вес монтажной люльки

| ВЛ напряжением, кВ                                     | Нормативная нагрузка, кг |
|--|--------------------------|
| Выше 330   | 250                      |
| 330 и ниже с подвесными изоляторами:<br>амперные опоры | 200                      |
| промежуточные  | 150                      |
| штыревые изоляторы                                     | 100                      |

Тогда

$$G_{\text{мл}}^{\text{p}} = 1,3 \cdot 0,150 = 0,195 \cdot 10^3 \text{ даН.}$$

Тяжение провода

$$T_{\text{п}}^{\text{p}} = 1,144 \cdot 10^3.$$

$$\begin{aligned} \sum G^{\text{p}} &= 0,5G_{\text{г}}^{\text{p}} + G_{\text{г}}^{\text{p}} + G_{\text{мл}}^{\text{p}} + 0,5G_{\text{тр}}^{\text{p}} = 0,5 \cdot 0,685 + 0,737 + 0,195 + \\ &+ 0,5 \cdot 0,103 = 1,326 \cdot 10^3 \text{ даН.} \end{aligned}$$

$$U_m = \frac{T_{\text{п}}^{\text{p}} l_{\text{трав}}}{h \cos \gamma} + \frac{G^{\text{p}} l_{\text{трав}}}{2h \cos \alpha};$$

$$U_4 = \frac{1,44 \cdot 2,925}{1 \cdot \cos 11^\circ} + \frac{1,326 \cdot 2,925}{2 \cdot 1 \cdot \cos 18^\circ} = 6,32 \cdot 10^3 \text{ даН.}$$

$$D_{1\text{г max}} = \frac{T_{\text{п}}^{\text{p}} b}{a} = \frac{1,144 \cdot 0,36}{0,26} = 1,584 \cdot 10^3 \text{ даН.}$$

Расположение стержней выбирают самостоятельно, по усмотрению проектировщика, в зависимости от действующих нагрузок. Расстояния  $a$  и  $b$  выбираются аналогично.

Находим усилия в тяге. Расчетный режим – нормальный при гололеде:

$$\sum G^p = 3,065 + 0,0737 + 0,5 \cdot 0,103 = 3,19 \cdot 10^3 \text{ даН,}$$

$$S_{1T} = \frac{G^p l_{\text{трав}}}{2h \cos \gamma \cos \alpha} = \frac{3,19 \cdot 2,925}{2 \cdot 1 \cdot \cos 18^\circ \cdot \cos 11^\circ} = 4,997 \cdot 10^3 \text{ даН.}$$

*Средняя траверса* (рис. 2.9)

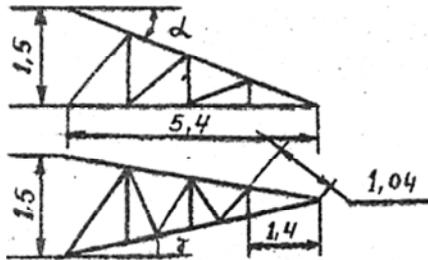


Рис. 2.10. Схема для расчета верхней траверсы

Исходные данные:

$$\alpha = 15^\circ,$$

$$\gamma = 8^\circ,$$

$$G_{\text{тр}}^p = 0,25 \cdot 10^3 \text{ даН.}$$

$$G_{\text{мл}}^p = 0,195 \cdot 10^3 \text{ даН.}$$

$$T_{\text{п}}^p = 1,144 \cdot 10^3 \text{ даН.}$$

$$G^p = 0,5 \cdot 0,685 + 0,0737 + 0,195 + 0,5 \cdot 0,25 = 0,736 \cdot 10^3 \text{ даН.}$$

$$D_{2T \text{ max}} = \frac{1,144 \cdot 1,4}{1,04} = 1,54 \cdot 10^3 \text{ даН.}$$

$$\sum G^p = 3,065 + 0,737 + 0,5 \cdot 0,25 = 3,927 \cdot 10^3 \text{ даН.}$$

$$S_{2T} = \frac{3,927 \cdot 5,4}{2 \cdot 1,5 \cdot \cos 15^\circ \cdot \cos 8^\circ} = 7,39 \cdot 10^3 \text{ даН.}$$

### Нижняя траверса (рис. 2.11)

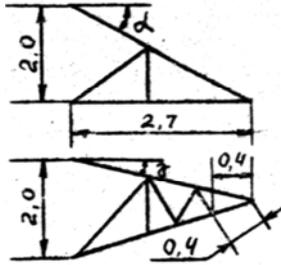


Рис. 2.11. Схема для расчета нижней траверсы

Исходные данные:

$$\alpha = 40^\circ,$$

$$\gamma = 20^\circ,$$

$$G_{\text{тр}}^p = 0,143 \cdot 10^3 \text{ даН.}$$

$$G_{\text{мл}}^p = 0,195 \cdot 10^3 \text{ даН.}$$

$$T_{\text{п}}^p = 1,144 \cdot 10^3 \text{ даН.}$$

$$U_6 = \frac{1,144 \cdot 2,7}{2 \cos 20^\circ} + \frac{0,683 \cdot 2,7}{2 \cdot 2 \cdot \cos 40^\circ} = 2,245 \cdot 10^3 \text{ даН.}$$

$$G^p = 0,5 \cdot 0,685 + 0,0737 + 0,195 + 0,5 \cdot 0,143 = 0,683 \cdot 10^3 \text{ даН.}$$

$$D_{3\text{т max}} = \frac{1,144 \cdot 0,4}{0,4} = 1,144 \cdot 10^3 \text{ даН.}$$

$$\sum G^p = 3,065 + 0,0737 + 0,5 \cdot 0,143 = 3,21 \cdot 10^3 \text{ даН.}$$

$$S_{3\text{т}} = \frac{3,21 \cdot 2,7}{2 \cdot 2 \cdot \cos 20^\circ \cdot \cos 40^\circ} = 3,01 \cdot 10^3 \text{ даН.}$$

## 2.6. Расчет гибкости поясов и раскосов

### Проверка на прочность поясов и раскосов и их подбор

При расчете гибкости пояса верхней секции следует учитывать, что крайние точки рассматриваемой панели закреплены в обеих гранях. Между точками закрепления сжатый пояс может изгибаться в лю-

бом направлении, т. е. и в направлении наименьшей жесткости. Поэтому гибкость определяется по минимальному радиусу инерции, а коэффициент расчетной длины пояса принимается  $\mu_{п} = 1$ .

У поясов  $U_2$  и  $U_3$  крайние точки рассматриваемой панели закреплены только в одной грани, а между этими точками имеется закрепление в перпендикулярной грани. Между точками закрепления сжатый пояс может изгибаться только параллельно закреплению в средней точке, поэтому гибкость определяется по радиусу инерции  $Z_x$ . При креплении раскосов к поясу одним болтом (так в нашем случае) на расчетную длину пояса вводится коэффициент  $\mu_{п} = 1,14$ , учитывающий некоторую подвижность крайних точек, закрепленных только в одной грани.

Проведем расчет пояса  $U_1$  верхней секции:

$$\lambda = \frac{l'_{рп}}{Z_x} = \frac{155}{3,87} = 40.$$

Расчетная гибкость

$$\lambda_p = \mu_{п}\lambda = 1 \cdot 40 = 40.$$

Предположим, что уголок выполнен из стали класса С 38/23. Тогда по табл. 2.18 путем линейной интерполяции находим коэффициент  $\phi$  продольного изгиба:  $\phi = 0,905$ .

Таблица 2.18

Коэффициенты  $\phi$  продольного изгиба  
центрально сжатых элементов

| Гибкость элементов $\lambda$ | Коэффициенты $\phi$ для сталей классов |         | Гибкость элементов $\lambda$ | Коэффициенты $\phi$ для сталей классов |         |
|------------------------------|--|---------|------------------------------|--|---------|
|                              | С 38/23                                | С 46/33 |                              | С 38/23                                | С 46/33 |
| 0                            | 1                                      | 1       | 120                          | 0,488                                  | 0,35    |
| 20                           | 0,97                                   | 0,968   | 140                          | 0,348                                  | 0,256   |
| 40                           | 0,905                                  | 0,888   | 160                          | 0,282                                  | 0,2     |
| 60                           | 0,82                                   | 0,78    | 180                          | 0,216                                  | 0,15    |
| 80                           | 0,715                                  | 0,637   | 200                          | 0,175                                  | 0,129   |
| 90                           | 0,655                                  | 0,563   | 220                          | 0,146                                  | 0,108   |
| 100                          | 0,582                                  | 0,482   |                              |  |         |
|                              | 0,512                                  | 0,413   |                              |  |         |

Из табл. 2.19 выбираем коэффициент условий работы  $m = 1,0$ . Затем определяем значение выражения  $F\varphi m$ , где  $F$  – площадь сечения стержня:

$$F\varphi m = 19,7 \cdot 0,905 \cdot 1,2 = 17,83.$$

Таблица 2.19

Коэффициент  $m$  условий работы элементов  
стальных конструкций опор

| Элементы опоры  | Элементы, соединяемые сваркой | Элементы, соединяемые болтами |
|---|-------------------------------|-------------------------------|
| 1   | 2                             | 3                             |
| <b>П о я с а</b>  |                               |                               |
| Сжатые пояса верхних и средних секций свободно стоящих опор и сжатые пояса опор на оттяжках | 1,0                           | 1,0                           |
| Сжатые пояса нижних секций свободно стоящих опор в первых двух панелях от опорного башмака  | 0,95                          | 0,9                           |
| Растянутые пояса с проколотыми дырами   | 0,9                           | 0,9                           |
| Сжатые пояса траверс при креплении к стволу через фасонку                                   | 0,755                         | 0,755                         |
| <b>Р а с к о с ы</b>  |                               |                               |
| Сжатые раскосы треугольной решетки с узлами, не совмещенными в смежных гранях               | 0,8                           | 0,75*                         |
| Сжатые раскосы треугольной решетки с распорками   | 1,0                           | 0,75*                         |
| Сжатые раскосы перекрестной решетки с узлами, не совмещенными в смежных гранях              | 0,8                           | 0,75*                         |
| То же с совмещенными узлами   | 0,9                           | 0,75*                         |
| Сжатые составные элементы решетки из двух равнобоких уголков, прикрепляемых одной полкой    | 0,75                          | 0,75*                         |

\*При установке в узле не менее двух болтов принимается как для элементов, соединяемых сваркой.

| 1  | 2   | 3 |
|--|---|---|
| <p style="text-align: center;"><b>Оттяжки</b></p> <p>Оттяжки опор из стальных канатов или пучков высокопрочной проволоки:</p> <p>а) для промежуточных опор в нормальном режиме;</p> <p>то же в аварийном режиме</p> <p>б) для анкерных и угловых опор в нормальном режиме;</p> <p>то же в аварийном режиме</p> | <p>0,9</p> <p>1,0</p> <p>0,8</p> <p>0,9</p> |   |

После чего определяется напряжение:

$$\sigma = \frac{U_1}{F \varphi m} = \frac{21813}{17,83} = 1223,4 < 2100 \text{ даН/см}^2.$$

Условие прочности выполняется, уголок выбран правильно.

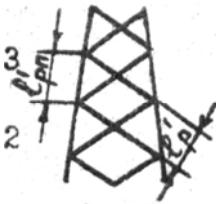


Рис. 2.12. Геометрическая схема для определения гибкости раскосов

При определении гибкости раскосов длина по геометрической схеме  $l'_p$  (рис. 2.12) умножается на понижающий коэффициент длины  $\mu_p$ . При креплении раскосов к поясу одним болтом значения  $\mu_p$  определяются только в зависимости от гибкости  $l'_p/Z_y$ . Так, например, для раскоса  $D_{10}$  верхней секции опоры с геометрической длиной  $l'_p = 205$  см при уголке  $80 \times 6$  с минимальным радиусом инерции  $Z_y = 1,58$  гибкость  $\lambda = 205/1,58 = 130$ .

Для этой гибкости по табл. 2.20 находим коэффициент длины раскоса  $\mu_p = 0,855$  и окончательное значение гибкости для расчета

$$\lambda_p = \mu_p \lambda = 0,855 \cdot 130 = 111.$$

Таблица 2.20

Значение коэффициента  $\mu_p$  для болтовых конструкций с прикреплением раскосов одним болтом

| $l_p/P_{y \min}$ | $\mu_p$ | $l_p/P_{y \min}$ | $\mu_p$ |
|------------------|---------|------------------|---------|
| До 80            | 1       | 160              | 0,8     |
| 100              | 0,94    | 180              | 0,78    |
| 120              | 0,88    | 200              | 0,77    |
| 140              | 0,83    |                  |         |

Для раскосов, закрепляемых сваркой или двумя и более болтами, значение  $\mu_p$  следует определять в зависимости от гибкости и отношения наименьших погонных жесткостей пояса и раскоса:

$$K = \frac{i_{\Pi}}{i_p} = \frac{I_{\Pi \min} l'_p}{I_{a \min} l'_{\text{рп}}}$$

Условно примем  $K = 1,32$ .

Так, для раскоса  $D_5$  тросостойки опоры

$$\lambda = 160/1,53 = 104.$$

По табл. 2.21 для  $\lambda = 104$  и  $K = 1,32$  находим  $\mu_p = 0,88$ . Тогда

$$\lambda_p = 0,88 \cdot 104 = 92.$$

Таблица 2.21

Значение коэффициента  $\mu_p$  для сварных конструкций и для болтовых конструкций с прикреплением раскосов двумя и более болтами по длине раскоса

| $i_{\Pi}/i_p$ | $l_p/\rho$ |      |      |      |      |      |     |
|---------------|------------|------|------|------|------|------|-----|
|               | До 80      | 100  | 120  | 140  | 160  | 180  | 200 |
| До 2          | 0,98       | 0,89 | 0,83 | 0,77 | 0,74 | 0,72 | 0,7 |
| 6 и выше      | 0,92       | 0,84 | 0,78 | 0,74 | 0,7  | 0,7  | 0,7 |

Проверка раскосов на прочность аналогична расчету на прочность поясов. Если прочность пояса или раскоса недостаточна, то необходимо его заменить другим и расчет проделать повторно. Таким образом производят подбор уголков для опоры.

Так, для раскоса  $D_5$  тросостойки с учетом  $\varphi = 0,57$ ;  $m = 0,8$  и  $F = 4,8 \text{ см}^2$  имеем

$$F\varphi m = 0,57 \cdot 0,8 \cdot 4,8 = 2,19.$$

Затем определяется напряжение:

$$\sigma = \frac{N}{F\varphi m} = \frac{1256}{2,19} = 573 < 2100 \text{ даН/см}^2.$$

Здесь  $N$  – расчетное усилие в стержне.

Такие величины, как площадь сечения, момент сопротивления, радиусы инерции, берутся из учебников по сопротивлению материалов в таблицах уголков.

Выбор болтов и их расчет производится в п. 4.2.

Более подробно о расчете гибкости и выборе сечения стержней конструкций опор можно узнать в [1, § 7.4].

Коэффициент условий работы для поясов  $m$  принят в зависимости от схемы решетки и выполнения соединений на болтах или сваркой по табл. 2.19. В соответствии с этой таблицей пояса с проколотыми отверстиями должны быть проверены на растяжение с коэффициентом условий работы, равным 0,9. В нашем случае раскосы к поясам крепятся посредством болтов, поэтому пояса имеют отверстия. Необходимо выполнить расчет поясов на растяжение. Сделаем, к примеру, расчет пояса средней секции.

Растягивающее усилие в поясе

$$\begin{aligned} U_{\text{тр}} &= \frac{\sum M_{mx}^P}{2b_{mx} \cos \gamma} - 0,9 \frac{G_m^P}{4(\cos \gamma)^2} = \\ &= \frac{201,1}{2 \cdot 4,1 \cdot 0,998} - 0,9 \frac{9,51}{4 \cdot 0,998^2} = 22,425 \cdot 10^3 \text{ даН.} \end{aligned}$$

Площадь сечения пояса

$$F_{\text{нт}} = F - hd,$$

где  $F$  – площадь поперечного сечения уголка (берется из таблиц учебников по сопротивлению материалов);

$h$  – толщина стенки уголка;

$d$  – диаметр отверстия под крепление раскоса (рис. 2.13).

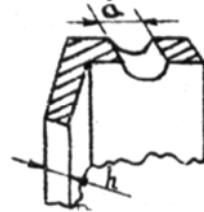


Рис. 2.13. Сечение пояса

$$F_{\text{нт}2} = 19,7 - 0,6 \cdot 3,0 = 17,9 \text{ см}^2.$$

Проверяем на прочность:

$$\sigma = \frac{U_{\text{тр}}}{mF_{\text{нт}}},$$

где  $m$  – коэффициент условий работы:  $m = 0,9$ .

$$\sigma = \frac{22425}{0,9 \cdot 17,9} = 1392 \text{ даН/см}^2 < 2100 \text{ даН/см}^2.$$

Условие прочности выполняется, поэтому пояс будет нормально работать и на растяжение.

Аналогично рассчитываются и другие пояса с отверстиями.

Результаты расчета сведены в табл. 2.22.

## Общие результаты расчетов

| Часть опоры    | Обозначение элементов | Расчетное усилие            |                                 | Расчетная схема режима | Сечение стержня  | Площадь сечения $F$ , $\text{см}^2$ | Момент сопротивления, $\text{см}^2$ | Радиусы инерции |       | Длина элемента по схеме $l_p$ | $\lambda = l_p / Z$ |
|----------------|-----------------------|-----------------------------|---------------------------------|------------------------|------------------|-------------------------------------|-------------------------------------|-----------------|-------|-------------------------------|---------------------|
|                |                       | Сжатие $N \cdot 10^3$ , даН | Растяжение $N \cdot 10^3$ , даН |                        |                  |                                     |                                     | $Z_x$           | $Z_y$ |                               |                     |
| 1              | 2                     | 3                           | 4                               | 5                      | 6                | 7                                   | 8                                   | 9               | 10    | 11                            | 12                  |
| Тросо-стойка   | $U_r$                 | 2,2                         | -                               | I                      | $63 \times 5$    | 6,13                                | -                                   | 1,94            | -     | 1,8                           | 93                  |
|                | $D_1$                 | 2,64                        | 2,64                            | III                    | $50 \times 5$    | 4,8                                 | -                                   | 1,53            | -     | 1,4                           | 92                  |
|                | $D_2$                 | 2,184                       | 2,184                           | III                    | $50 \times 5$    | 4,8                                 | -                                   | 1,53            | -     | 1,5                           | 98                  |
|                | $D_3$                 | 1,792                       | 1,792                           | III                    | $50 \times 5$    | 4,8                                 | -                                   | 1,53            | -     | 1,5                           | 98                  |
|                | $D_4$                 | 1,439                       | 1,439                           | III                    | $50 \times 5$    | 4,8                                 | -                                   | 1,53            | -     | 1,5                           | 98                  |
|                | $D_5$                 | 1,256                       | 1,256                           | III                    | $50 \times 5$    | 4,8                                 | -                                   | 1,53            | -     | 1,6                           | 104                 |
|                | $D_6$                 | 1,057                       | 1,057                           | VI                     | $50 \times 5$    | 4,8                                 | -                                   | 1,53            | -     | 1,8                           | 118                 |
|                | $D_7$                 | 0,994                       | 0,994                           | III                    | $50 \times 5$    | 4,8                                 | -                                   | -               | 0,98  | 1,6                           | 131                 |
| Верхняя секция | $U_1$                 | 21,813                      | -                               | I                      | $125 \times 8$   | 19,7                                | -                                   | 3,87            | -     | 1,55                          | 40                  |
|                | $D_8$                 | 8,213                       | 8,213                           | III                    | $80 \times 6$    | 9,38                                | -                                   | -               | 1,58  | 1,75                          | 89                  |
|                | $D_9$                 | 7,88                        | 7,88                            | III                    | $80 \times 6$    | 9,38                                | -                                   | -               | 1,68  | 1,9                           | 96                  |
|                | $D_{10}$              | 7,19                        | 7,19                            | III                    | $80 \times 6$    | 9,38                                | -                                   | -               | 1,58  | 2,05                          | 130                 |
|                | $D_{11}$              | 6,789                       | 6,789                           | III                    | $80 \times 6$    | 9,38                                | -                                   | -               | 1,58  | 2,2                           | 11                  |
|                | $D_{12}$              | 6,556                       | 6,556                           | III                    | $80 \times 6$    | 9,38                                | -                                   | -               | 1,58  | 2,45                          | 12                  |
|                | $D_{13}$              | 10,37                       | 10,37                           | III                    | $100 \times 6,5$ | 12,8                                | -                                   | -               | 1,99  | 2,5                           | 101                 |
|                | $D_{14}$              | 9,916                       | 9,916                           | III                    | $100 \times 6,5$ | 12,8                                | -                                   | -               | 1,99  | 2,75                          | 110                 |
|                | $D_{15}$              | 9,211                       | 9,211                           | III                    | $100 \times 6,5$ | 12,8                                | -                                   | -               | 1,99  | 2,9                           | 116                 |

Продолжение табл. 2.22

| 1                | 2            | 3      | 4     | 5   | 6      | 7    | 8    | 9    | 10   | 11   | 12  |
|------------------|--------------|--------|-------|-----|--------|------|------|------|------|------|-----|
| Средняя секция   | $U_2$        | 26,96  | -     | I   | 125×8  | 19,7 | -    | 3,87 | -    | 2    | 52  |
|                  | $D_{16}$     | 9,307  | 9,307 | III | 100×8  | 15,6 | -    | -    | 1,98 | 3,35 | 135 |
|                  | $D_{17}$     | 8,459  | 8,459 | III | 100×8  | 15,6 | -    | -    | 1,98 | 3,5  | 141 |
|                  | $D_{18}$     | 7,824  | 7,824 | III | 100×8  | 15,6 | -    | -    | 1,98 | 3,7  | 141 |
|                  | $D_{19}$     | 7,448  | 7,448 | III | 100×8  | 15,6 | -    | -    | 1,98 | 3,9  | 157 |
|                  | $D_{20}$     | 6,836  | 6,836 | III | 100×8  | 15,6 | -    | -    | 1,98 | 4,1  | 166 |
|                  | $D_{21}$     | 6,280  | 6,280 | III | 100×8  | 15,6 | -    | -    | 1,98 | 4,3  | 174 |
| Нижняя секция    | $U_3$        | 36,131 | -     | I   | 125×10 | 24,3 | -    | 3,85 | -    | 2,1  | -   |
|                  | $D_{22}$     | 5,971  | 5,971 | III | 100×8  | 15,6 | -    | -    | 1,98 | 4,5  | 182 |
|                  | $D_{23}$     | 5,664  | 5,664 | III | 100×8  | 15,6 | -    | -    | 1,98 | 4,7  | 190 |
|                  | $D_{24}$     | 5,404  | 5,404 | III | 100×8  | 15,6 | -    | -    | 1,98 | 5    | 202 |
|                  | $D_{25}$     | 5,147  | 5,147 | III | 100×8  | 15,6 | -    | -    | 1,98 | 5,2  | 210 |
|                  | $D_{26}$     | 4,866  | 4,866 | III | 100×8  | 15,6 | -    | -    | 1,98 | 5,4  | 218 |
|                  | $D_{27}$     | 4,603  | 4,603 | III | 100×8  | 15,6 | -    | -    | 1,98 | 5,7  | 230 |
| Верхняя траверса | $U_4$        | 4,428  | -     | III | 125×10 | 24,3 | -    | -    | 2,47 | 3    | 120 |
|                  | $D_{17,max}$ | 1,583  | 1,584 | III | 80×6   | 9,38 | 4,07 | -    | 1,58 | 1,56 | 99  |
|                  | $S_{1T}$     | -      | 4,997 | II  | 100×8  | 15,6 | -    | -    | 1,98 | 3,1  | 156 |
| Средняя траверса | $U_5$        | 5,53   | -     | III | 160×18 | 54,8 | -    | -    | 3,13 | 5,4  | 175 |
|                  | $D_{27,max}$ | 1,54   | 1,54  | III | 125×10 | 24,3 | 6,35 | -    | 2,47 | 1,8  | 73  |
|                  | $S_{2T}$     | -      | 6,142 | II  | 140×9  | 24,7 | -    | -    | 2,79 | 5,64 | 200 |
| Нижняя траверса  | $U_6$        | 2,245  | -     | III | 100×8  | 15,6 | -    | -    | 1,98 | 2,9  | 146 |
|                  | $D_{3T,max}$ | 1,144  | 1,144 | III | 80×6   | 9,38 | 4,07 | -    | 1,58 | 1,8  | 114 |
|                  | $S_{3T}$     | -      | 3,01  | II  | 100×8  | 15,6 | -    | -    | 1,98 | 3,8  | 192 |

Продолжение табл. 2.22

| Обозначение | $K = \frac{i_{II}}{i_P}$ | $\mu_P$<br>или<br>$\mu_{II}$ | Гибкость                    |                                   | Коэффициент<br>допуска-<br>емого<br>снижения<br>$\phi$ | Коэффи-<br>циент<br>условий<br>работы<br>$m$ | $F_{\phi m}$ | Напряжение |                 | Допус-<br>каемое<br>напря-<br>жение<br>$R$ | Число<br>и диа-<br>метр<br>болтов | Несу-<br>щая<br>способ-<br>соб-<br>ность<br>болтов,<br>$10^3$ даН |
|-------------|--------------------------|------------------------------|-----------------------------|-----------------------------------|--|--|--------------|------------|-----------------|--|-----------------------------------|---|
|             |                          |                              | $\lambda_P = \mu_P \lambda$ | $\lambda_{II} = \mu_{II} \lambda$ |  |  |              | от $N$     | $\Sigma \sigma$ |  |                                   |   |
| 1           | 2                        | 3                            | 4                           | 5                                 | 6  | 7  | 8            | 9          | 10              | 11   | 12                                | 13  |
| $U_r$       | -                        | 1,14                         | 106                         | 106                               | 0,54   | 1  | 3,31         | 664,7      | 664,7           | 2100                                       | 2M20                              | 8,17  |
| $D_1$       | 1,32                     | 0,93                         | -                           | 85                                | 0,63   | 1  | 2,42         | 1083       | 1083            | 2100                                       | -                                 | -   |
| $D_2$       | 1,32                     | 0,89                         | -                           | 87                                | 0,62   | 0,8  | 2,38         | 917        | 917             | 2100                                       | -                                 | -   |
| $D_3$       | 1,32                     | 0,89                         | -                           | 87                                | 0,62   | 0,8  | 2,38         | 752        | 752             | 2100                                       | -                                 | -   |
| $D_4$       | 1,32                     | 0,89                         | -                           | 87                                | 0,62   | 0,8  | 2,38         | 604        | 604             | 2100                                       | -                                 | -   |
| $D_5$       | 1,32                     | 0,88                         | -                           | 92                                | 0,67   | 0,8  | 2,19         | 573        | 573             | 2100                                       | -                                 | -   |
| $D_6$       | 1,32                     | 0,84                         | -                           | 99                                | 0,52   | 0,8  | 1,99         | 529        | 529             | 2100                                       | -                                 | -   |
| $D_7$       | -                        | 0,83                         | -                           | -                                 | 0,47   | 0,8  | 1,81         | 551        | 551             | 2100                                       | -                                 | -   |
| $U_1$       | -                        | 1                            | -                           | 40                                | 0,905  | 1  | 17,83        | 1223       | 2035            | 2100                                       | 4M30                              | 36,76   |
| $D_8$       | -                        | 0,94                         | 83                          | -                                 | 0,65   | 0,75   | 4,57         | 1796       | 1796            | 2100                                       | 1M30                              | 9,19  |
| $D_9$       | -                        | 0,94                         | 90                          | -                                 | 0,58   | 0,75   | 4,08         | 1931       | 1931            | 2100                                       | 1M30                              | 9,19  |
| $D_{10}$    | -                        | 0,85                         | 111                         | -                                 | 0,51   | 0,75   | 3,59         | 2004       | 2040            | 2100                                       | 1M30                              | 9,19  |
| $D_{11}$    | -                        | 0,9                          | 100                         | -                                 | 0,52   | 0,75   | 3,66         | 1856       | 1856            | 2100                                       | 1M30                              | 9,19  |
| $D_{12}$    | -                        | 0,86                         | 107                         | -                                 | 0,47   | 0,75   | 3,31         | 1983       | 1983            | 2100                                       | 1M30                              | 9,19  |
| $D_{13}$    | -                        | 0,94                         | 95                          | -                                 | 0,52   | 0,75   | 5            | 2077       | 2077            | 2100                                       | 1M36                              | 13,23   |
| $D_{14}$    | -                        | 0,91                         | 100                         | -                                 | 0,51   | 0,75   | 4,9          | 2025       | 2025            | 2100                                       | 1M36                              | 13,23   |
| $D_{15}$    | -                        | 0,9                          | 104                         | -                                 | 0,47   | 0,75   | 4,51         | 2041       | 2041            | 2100                                       | 1M36                              | 13,23   |

Окончание табл. 2.22

| 1             | 2 | 3    | 4   | 5  | 6     | 7    | 8     | 9    | 10   | 11   | 12   | 13    |
|---------------|---|------|-----|----|-------|------|-------|------|------|------|------|-------|
| $U_2$         | - | 1,14 | -   | -  | 0,78  | 1    | 15,37 | 2018 | 2018 | 2100 | 4M30 | 36,76 |
| $D_{16}$      | - | 0,85 | 115 | -  | 0,4   | 0,75 | 4,68  | 1988 | 1988 | 2100 | 1M30 | 9,19  |
| $D_{17}$      | - | 0,83 | 117 | -  | 0,4   | 0,75 | 4,68  | 1807 | 1807 | 2100 | 1M30 | 9,19  |
| $D_{18}$      | - | 0,81 | 121 | -  | 0,37  | 0,75 | 4,33  | 1807 | 1807 | 2100 | 1M30 | 9,19  |
| $D_{19}$      | - | 0,8  | 126 | -  | 0,33  | 0,75 | 3,86  | 1929 | 1929 | 2100 | 1M30 | 9,19  |
| $D_{20}$      | - | 0,8  | 132 | -  | 0,32  | 0,75 | 3,74  | 1826 | 1826 | 2100 | 1M30 | 9,19  |
| $D_{21}$      | - | 0,78 | 136 | -  | 0,3   | 0,75 | 3,51  | 1789 | 1789 | 2100 | 1M30 | 9,19  |
| $U_3$         | - | 1,14 | -   | 62 | 0,77  | 0,8  | 16,8  | 1925 | 1925 | 2100 | 4M30 | 36,76 |
| $D_{22}$      | - | 0,78 | 142 | -  | 0,28  | 0,75 | 3,28  | 1823 | 1823 | 2100 | 1M24 | 5,88  |
| $D_{23}$      | - | 0,77 | 147 | -  | 0,25  | 0,75 | 2,93  | 1936 | 1936 | 2100 | 1M24 | 5,88  |
| $D_{24}$      | - | 0,77 | 155 | -  | 0,23  | 0,75 | 2,69  | 2008 | 2008 | 2100 | 1M24 | 5,88  |
| $D_{25}$      | - | 0,76 | 166 | -  | 0,202 | 0,75 | 2,57  | 2000 | 2000 | 2100 | 1M24 | 5,88  |
| $D_{26}$      | - | 0,75 | 164 | -  | 0,21  | 0,75 | 2,96  | 1986 | 1986 | 2100 | 1M24 | 5,88  |
| $D_{27}$      | - | 0,75 | 173 | -  | 0,19  | 0,75 | 2,22  | 2071 | 2071 | 2100 | 1M24 | 5,88  |
| $U_4$         | - | -    | 120 | -  | 0,48  | 0,75 | 8,75  | 1329 | 1329 | 2100 | 2M24 | 11,76 |
| $D_{1r \max}$ | - | -    | 99  | -  | 0,53  | 1    | 4,97  | 996  | 996  | 2100 | -    | -     |
| $S_{1r}$      | - | -    | 156 | -  | 0,24  | -    | 3,74  | 1100 | 1100 | 2100 | 4M16 | 31,41 |
| $U_5$         | - | -    | 175 | -  | 0,19  | 0,75 | 7,81  | 1833 | 1833 | 2100 | 2M30 | 18,38 |
| $D_{2r \max}$ | - | -    | 73  | -  | 0,7   | 1    | 17,01 | 283  | 283  | 2100 | -    | -     |
| $S_{2r}$      | - | -    | 200 | -  | 0,2   | -    | 4,94  | 1030 | 1030 | 2100 | 4M16 | 31,4  |
| $U_6$         | - | -    | 146 | -  | 0,25  | 0,75 | 2,93  | 1562 | 1562 | 2100 | 2M16 | 5,23  |
| $D_{3r \max}$ | - | -    | 114 | -  | 0,43  | 1    | 4,03  | 1046 | 1046 | 2100 | -    | -     |
| $S_{3r}$      | - | -    | 192 | -  | 0,16  | -    | 2,5   | 797  | 797  | 2100 | 4M16 | 31,4  |

### 3. РАСЧЕТ ТРАВЕРСЫ НА ПРОЧНОСТЬ

Для удобства расчет произведем для передней грани траверсы, приняв ее в качестве плоской фермы. Расчет следует начинать с определения значений опорных реакций, для чего будем использовать условия равновесия сил, приложенных к ферме (рис. 3.1).

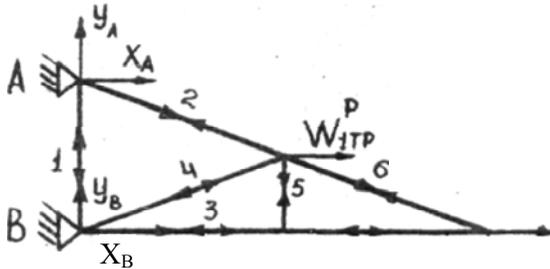


Рис. 3.1. Схема для определения опорных реакций траверсы

Определяем значения опорных реакций.

$$\sum M_A = 0: \quad X_B \cdot 1 + W_{1тр}^p \cdot 0,5 + p_{п}^p \cdot 1 - (G_{п}^p + G_{г}^p) \cdot 2,925 = 0.$$

$$\sum Y = 0: \quad Y_A + Y_B - (G_{п}^p + G_{г}^p) = 0.$$

$$\sum X = 0: \quad X_A + X_B + W_{1тр}^p + p_{п}^p = 0.$$

$$X_B = -W_{1тр}^p \cdot 0,5 - p_{п}^p \cdot 1 + (G_{п}^p + G_{г}^p) \cdot 2,925 = -229,7 \cdot 0,5 - 978 \cdot 1 + (684,9 + 73,7) \cdot 2,925 = 1126 \text{ даН.}$$

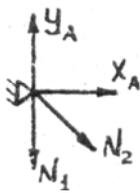
$$X_A = -X_B - W_{1тр}^p - p_{п}^p = -1126 - 229,7 - 978 = -2334 \text{ даН.}$$

В реальных конструкциях реакции опор  $Y_A$  и  $Y_B$ , конечно же, не равны, но для упрощения расчета примем их одинаковыми, что не окажет большого влияния на качество и точность расчета.

$$Y_A = Y_B = \frac{G_{п}^p + G_{г}^p}{2} = \frac{684,9 + 73,7}{2} = 379,3 \text{ даН.}$$

Определим усилия в заданных стержнях фермы методом вырезания узлов.

Узел А



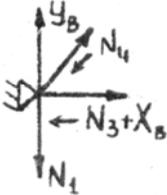
$$\sum Y = 0: \quad Y_A + N_1 - N_2 \sin \alpha = 0.$$

$$\sum X = 0: \quad X_A + N_2 \cos \alpha = 0.$$

$$N_2 = -\frac{X_A}{\cos \alpha} = -\frac{2334}{\cos 18^\circ} = 2454 \text{ даН (растяжение).}$$

$$N_1 = Y_A - N_2 \sin \alpha = 379,3 - 2 \cdot 2454 \cdot \sin 18^\circ = -379 \text{ даН (сжатие).}$$

Узел В

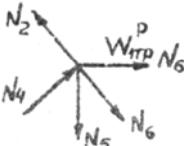


$$\sum Y = 0: \quad Y_B - N_1 + N_4 \sin \alpha = 0.$$

$$\sum X = 0: \quad X_B + N_3 + N_4 \cos \alpha = 0.$$

$$N_4 = -\frac{-Y_B + N_1}{\sin \alpha} = -\frac{379 - 379,3}{\sin 18^\circ} = -0,971 \text{ даН (сжатие).}$$

Узел С



$$N_3 = -X_B - N_4 \cos \alpha = -1126 + 0,971 \cdot \cos 18^\circ = -1125 \text{ даН (сжатие).}$$

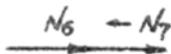
$$\sum Y = 0: \quad N_2 \sin \alpha + N_4 \sin \alpha - N_5 - N_6 \sin \alpha = 0.$$

$$\sum X = 0: \quad W_{1\text{тр}}^p + N_6 \cos \alpha + N_4 \cos \alpha - N_2 \cos \alpha = 0.$$

$$N_6 = \frac{N_2 \cos \alpha - N_4 \cos \alpha - W_{1\text{тр}}^p}{\cos \alpha} = \frac{2454 \cos 18 - 0,971 \cos 18 - 279,7}{\cos 18} =$$

$$= 2211,5 \text{ даН (растяжение).}$$

Узел Р

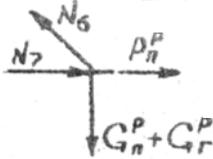


$$N_5 = N_2 \sin \alpha + N_4 \sin \alpha - N_6 \sin \alpha = \sin 18 \cdot (2454 + 0,971 - 2211,5) = 7522 \text{ даН (растяжение).}$$

$$\sum X = 0: \quad N_3 + N_7 = 0, \quad N_7 = -N_3 = -1125 \text{ даН (сжатие).}$$

Сделаем проверку на узле  $D$ .

$$\sum X = 0: \quad P_n^p + N_7 - N_6 \cos \alpha = 978 + 1125 - 2211,5 \cos 18^\circ = 0.$$



$$\sum Y = 0: \quad N_6 \sin \alpha - (G_n^p + G_r^p) = 0$$

$$2211,5 \sin 18^\circ - (684,9 + 73,7) = 75,21.$$

Сумма сил на ось  $Y$  должна равняться усилию в стержне  $N_5$ . Это связано с тем, что объемную конструкцию приняли за плоскую. В нашем случае  $75,24 \approx 75,21$ .

Сведем полученные результаты в таблицу (табл. 2.23).

$$\sigma_1 = \frac{379}{3,17} = 119,6 \text{ даН/см}^2.$$

$$\sigma_2 = \frac{2454}{15,6} = 157,3 \text{ даН/см}^2.$$

$$\sigma_5 = \frac{75,24}{9,38} = 8 \text{ даН/см}^2.$$

$$\sigma_6 = \frac{2211,5}{13,6} = 162,6 \text{ даН/см}^2.$$

Таблица 2.23

### Усилия в стержнях траверсы

| Продольная сила | Значение продольной силы, даН | Сечение стержня | Площадь сечения, см <sup>2</sup> |
|-----------------|-------------------------------|-----------------|----------------------------------|
| $N_1$           | 379 (сжатие)                  | $50 \times 4$   | 3,17                             |
| $N_2$           | 2454 (растяжение)             | $100 \times 8$  | 15,6                             |
| $N_3$           | 1125 (сжатие)                 | $125 \times 10$ | 24,3                             |
| $N_4$           | 0,971 (сжатие)                | $80 \times 6$   | 9,38                             |
| $N_5$           | 75,24 (растяжение)            | $80 \times 6$   | 9,38                             |
| $N_6$           | 2211,5 (растяжение)           | $100 \times 80$ | 15,6                             |
| $N_7$           | 1125 (сжатие)                 | $125 \times 10$ | 24,3                             |

$$\sigma_3 = \frac{1125}{24,3} = 46,3 \text{ даН/см}^2.$$

$$\sigma_7 = \frac{1125}{24,3} = 46,3 \text{ даН/см}^2.$$

$$\sigma_4 = \frac{0,971}{9,38} = 0,1 \text{ даН/см}^2.$$

$$[\sigma_{\text{доп}}] = 2100 \text{ даН/см}^2.$$

Условия прочности выполняются, конструкция выдержит нагрузки.

## 4. РАСЧЕТ СОЕДИНЕНИЙ НА ПРОЧНОСТЬ

### 4.1. Расчет сварных соединений

Сварные соединения деталей опор ЛЭП бывают следующих типов:

1. Соединения стыковые. К ним относятся заводские соединения поясов опор, применяемые при отсутствии на заводе уголков нужной длины, приварка фасонки к поясам, сварка листов и другие.

2. Соединения внахлестку. К этому виду соединений относятся основная масса соединений раскосов решетки с поясами, сварные узлы траверс, крепление поясов к вертикальным листам опорного башмака и т. п.

Соединение встык может выполняться стыковым или угловым швом. Расчет стыкового шва производится по формуле

$$\sigma = \frac{N^p}{\delta_m l_m} \leq \frac{R_p^{CB}}{R_V^{CB}},$$

где  $\delta_m$  – расчетная толщина шва, равная меньшей из толщин свариваемых элементов;

$l_m$  – длина сварного шва, равная ширине элемента минус 1 см;

$R_p^{cb}$  – расчетное сопротивление сварного шва на растяжение;

$R_V^{cb}$  – то же на сжатие.

Прочность косого шва проверяется при воздействии растягивающих (сжимающих) и срезающих усилий по формулам:

$$\sigma = \frac{N^p \sin \alpha}{\delta_m l_m} \leq R^{cb};$$

$$\tau = \frac{N^p \cos \alpha}{\delta_m l_m} \leq R_{cp}^{cb},$$

где  $R_{cp}^{cb}$  – расчетное сопротивление на срез сварного шва;

$\alpha$  – угол между направлением усилия и осью шва.

Расчет угловых швов (лобовых и фланговых) производится по формуле

$$\sigma = \frac{N}{0,7\delta_m l_m} \leq R_y^{cb},$$

где  $R_y^{cb}$  – расчетное сопротивление на срез углового шва.

Рассчитаем сварное соединение в узле крепления раскосов к поясу тросостойки опоры (рис. 4.1).

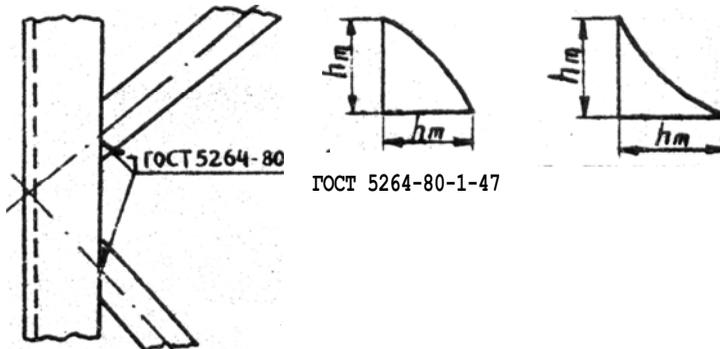


Рис. 4.1. Сварное соединение опоры

Расчет ведем по формуле

$$\sigma = \frac{N}{0,7\beta h_m l_m} \leq R_y^{CB},$$

где  $h_m$  – толщина углового шва, принимаемая равной катету вписанного равнобедренного треугольника;

$\beta$  – коэффициент, принимаемый в зависимости от вида сварки; для однопроходной автоматической сварки  $\beta = 1$ ; для двух- и трехпроходной  $\beta = 0,8$ ; для однопроходной полуавтоматической сварки  $\beta = 0,85$ ; для ручной сварки, а также для многопроходной автоматической сварки  $\beta = 0,7$ ;

$N$  – усилие в рассчитываемом раскосе;

$$R_y^{CB} = 1500 \text{ даН/см}^2.$$

Для  $D_6$

$$\sigma = \frac{1057}{0,7 \cdot 0,7 \cdot 0,7 \cdot 5,1} = 604,2 \text{ даН/см}^2 < 1500 \text{ даН/см}^2.$$

Для  $D_7$

$$\sigma = \frac{944}{0,7 \cdot 0,7 \cdot 0,7 \cdot 5,1} = 540 \text{ даН/см}^2 < 1500 \text{ даН/см}^2.$$

Условия выполняются, следовательно, сварные швы выдержат нагрузку.

#### 4.2. Расчет болтового соединения

Болтовые соединения в конструкциях ЛЭП являются основным видом монтажных соединений, выполняемых на трассе линии. В опорах применяются преимущественно соединения с болтами нормальной точности. Болты нормальной точности работают как на срез, так и на растяжение, при этом в опорах линий электропередачи болты работают в основном на срез. Болтовые соединения могут быть

как односрезными, так и двухсрезными; соединения, имеющие более двух срезов, в конструкциях опор применяются редко. Болты нормальной точности устанавливаются в отверстиях, номинальный диаметр которых для болтов диаметром до 30 мм на 1,5 мм больше номинального диаметра болта. С учетом допусков на изготовление болта и сверление отверстия разница между фактическими диаметрами болта и отверстия может достигать до 4 мм. Работа болтовых соединений без сдвигов, являющихся необратимыми, т. е. работа соединений в упругой области, определяется напряжением болта. Величина нормального болта  $N_0$  прямо пропорциональна моменту закручивания и может быть определена по приближенной формуле:

$$N_0 = \frac{2M_x}{d},$$

где  $d$  – диаметр болта.

Расчет на срез:

$$\frac{N}{n n_{\text{ср}} \frac{\pi d^2}{4}} \leq R_{\text{ср}},$$

где  $N$  – расчетная продольная сила, действующая на соединение;

$n$  – число болтов в соединении;

$n_{\text{ср}}$  – число рабочих срезов одного болта;

$d$  – диаметр отверстия для заклепки или наружный диаметр стержня болта;

$R_{\text{ср}}$  – расчетное сопротивление на срез: при одноболтовом соединении  $R_{\text{ср}} = 1500$ , при многоболтовом  $R_{\text{ср}} = 1300$  даН/см<sup>2</sup>.

Расчет на смятие ведется по формуле

$$\frac{N}{n d \sum \delta} \leq R_{\text{см}},$$

где  $\sum \delta$  – наименьшая суммарная толщина элементов, сжимаемых в одном направлении;

$R_{\text{см}}$  – расчетное сопротивление смятию:  $R_{\text{см}} = 3400$  даН/см<sup>2</sup>.

Проверим четырехболтовое соединение (М16) тяги средней траверсы со стойкой с накладной фасонкой на срез и смятие (рис. 4.2).

1. Проверка на срез:

$$N^P \leq \frac{\pi d^2}{4} n n_{\text{ср}} R_{\text{ср}},$$

$$6147 < \frac{3,14 \cdot (1,6)^2}{4} \cdot 4 \cdot 3 \cdot 1300 = 31\,366 \text{ даН.}$$

2. Проверка на смятие:

$$6147 < 1,6 \cdot 0,6 \cdot 4 \cdot 3400 = 13056 \text{ даН.}$$

Если хотя бы одно из условий не выполняется, то необходимо взять другой болт и опять проверить его на срез и смятие. Таким образом производится выбор болтов.

## 5. РАСЧЕТ АНКЕРНЫХ БОЛТОВ

Усилие в поясе нижней секции составляет  $U = 36,141 \cdot 10^3$  даН. Это усилие воспринимается двумя анкерными болтами фундамента (рис. 5.1).

Производим расчет анкерных болтов на растяжение:

$$\frac{U}{n F_{\text{нт}}} \leq R_{\text{р}}^{\delta},$$

где  $U$  – расчетная продольная сила, действующая на болтовое соединение;

$n$  – число болтов;

$F_{\text{нт}}$  – площадь болтового сечения, определяемая по формуле

$$F_{\text{нт}} = \frac{\pi}{16} (d_2 - d_3)^2,$$

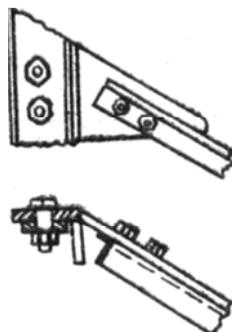


Рис. 4.2. Болтовое соединение траверсы со стойкой



Рис. 5.1. Анкерный болт фундамента

где  $d_2$  – номинальный средний диаметр резьбы;

$$d_3 = d_1 - \frac{H}{6},$$

где  $d_1$  – номинальный внутренний диаметр резьбы;

$H$  – теоретическая высота болта;

$R_p^\delta$  – расчетное сопротивление растяжению болта, равное 1700 даН/см<sup>2</sup>.

Определяем  $F_{нт}$  болтов:

$$F_{нт} \geq \frac{U}{nR_p^\delta} = \frac{36,141 \cdot 10^3}{2 \cdot 1700} = 10,6 \text{ см}^2.$$

По таблице СНиП П-В.3–72 принимаем болт диаметром 32 мм с площадью сечения нетто  $F_{нт} = 13,64 \text{ см}^2$ .

## Литература

1. Крюков, К. П. Конструкции и механический расчет линий электропередачи / К. П. Крюков, В. П. Новгородцев. – 2-е изд., перераб. и доп. – Л. : Энергия, Ленинградское отд-ние, 1979.
2. Справочник по проектированию линий электропередачи / М. В. Вязьменский [и др.] ; под ред. М. А. Реута и С. С. Рокотяна. – 2-е изд., перераб. и доп. – М. : Энергия, 1980.
3. Электротехнический справочник : в 3 т. / под общ. ред. И. Н. Орлова (гл. ред.) [и др.]. – 7-е изд., испр. и доп. – М. : Энергоатомиздат, 1988. – Т. 3, кн. 1: Производство и распределение электрической энергии.
4. Справочник по электрическим установкам высокого напряжения / под ред. И. А. Баумштейна, С. А. Бансанова. – 3-е изд., перераб. и доп. – М. : Энергоатомиздат, 1989.
5. Короткевич, М. А. Монтаж электрических сетей : учебное пособие / М. А. Короткевич. – Минск : Вышэйшая школа, 2012. – 511 с.
6. Короткевич, М. А. Проектирование линий электропередачи. Механическая часть : учебное пособие / М. А. Короткевич. – Минск : Вышэйшая школа, 2010. – 572 с.

## Содержание

|  |    |
|--|----|
| Предисловие.....   | 3  |
| 1. КЛАССИФИКАЦИЯ ПРОМЕЖУТОЧНЫХ ОПОР .....                                      | 9  |
| 2. РАСЧЕТ СТАЛЬНОЙ СВОБОДНОСТОЯЩЕЙ<br>ПРОМЕЖУТОЧНОЙ ОПОРЫ БАШЕННОГО ТИПА ..... | 10 |
| 2.1. Расчет нагрузок на опору от проводов и тросов .....                       | 10 |
| 2.2. Расчет ветровой нагрузки<br>на конструкцию опоры .....                    | 27 |
| 2.3. Определение усилий в поясах ствола опоры .....                            | 34 |
| 2.4. Определение усилий в раскосах ствола опоры.....                           | 38 |
| 2.5. Определение усилий в стержнях траверс.....                                | 42 |
| 2.6. Расчет гибкости поясов и раскосов .....                                   | 45 |
| 3. РАСЧЕТ ТРАВЕРСЫ НА ПРОЧНОСТЬ .....  | 56 |
| 4. РАСЧЕТ СОЕДИНЕНИЙ НА ПРОЧНОСТЬ .....  | 59 |
| 4.1. Расчет сварных соединений .....   | 59 |
| 4.2. Расчет болтового соединения.....  | 61 |
| 5. РАСЧЕТ АНКЕРНЫХ БОЛТОВ .....  | 63 |
| Литература .....   | 65 |

Учебное издание

**НИКОЛАЕНКО** Владимир Лаврентьевич  
**МИКУЛИК** Татьяна Николаевна

**РАСЧЕТ ДВУХЦЕПНОЙ ПРОМЕЖУТОЧНОЙ ОПОРЫ  
БАШЕННОГО ТИПА**

Учебно-методическое пособие  
для студентов специальности 1-43 01 02  
«Электроэнергетические системы и сети»

Редактор *Т. Н. Микулик*  
Компьютерная верстка *Н. А. Школьниковой*

Подписано в печать 08.09.2016. Формат 60×84 <sup>1</sup>/<sub>16</sub>. Бумага офсетная. Ризография.  
Усл. печ. л. 3,89. Уч.-изд. л. 3,04. Тираж 100. Заказ 613.

Издатель и полиграфическое исполнение: Белорусский национальный технический университет.  
Свидетельство о государственной регистрации издателя, изготовителя, распространителя  
печатных изданий № 1/173 от 12.02.2014. Пр. Независимости, 65. 220013, г. Минск.